

Rogério Tondato

**DESENVOLVIMENTO DE UM MODELO MATEMÁTICO
PARA DIMENSIONAMENTO DE ARMAZÉNS COM
ESTRUTURAS PORTA PALETES**

Tese submetida ao Programa de Pós
Graduação em Engenharia de Produção
da Universidade Federal de Santa
Catarina para a obtenção do Grau de
doutor em Engenharia de Produção.
Orientadora: Prof^a. Dr^a. Mirian Buss
Gonçalves

Florianópolis
2014

Ficha de identificação da obra elaborada pelo autor através do
Programa de Geração Automática da Biblioteca Universitária da UFSC.

Tondato, Rogério

DESENVOLVIMENTO DE UM MODELO MATEMÁTICO PARA
DIMENSIONAMENTO DE ARMAZÊNS COM ESTRUTURAS PORTA PALETES /
Rogério Tondato ; orientadora, Mirian Buss Gonçalves -
Florianópolis, SC, 2014.

210 p.

- Universidade Federal de Santa Catarina, Centro
Tecnológico. Programa de Pós-Graduação em Engenharia de
Produção.

Inclui referências

1. Engenharia de Produção. 2. Logística. 3. Armazenagem.
4. Leitura. 5. Otimização Matemática. I. Gonçalves, Mirian
Buss. II. Universidade Federal de Santa Catarina. Programa
de Pós-Graduação em Engenharia de Produção. III. Título.

Rogério Tondato

**DESENVOLVIMENTO DE UM MODELO MATEMÁTICO
PARA DIMENSIONAMENTO DE ARMAZÉNS COM
ESTRUTURAS PORTA PALETES**

Esta Tese foi julgada adequada para obtenção do Título de “Doutor” e aprovada em sua forma final pelo Programa de Pós-Graduação em Engenharia de Produção da Universidade Federal de Santa Catarina.

Florianópolis, 06 de maio de 2014.

Prof^ª. Lucila Maria de Souza Campos, Dr^a.
Coordenador do Curso de Pós-Graduação em Engenharia de Produção
Banca Examinadora:

Prof.^a Mirian Buss Gonçalves, Dr.^a (Orientadora)
Universidade Federal de Santa Catarina

Prof. Antônio Galvão Naclério Novaes, Dr.
Universidade Federal de Santa Catarina

Prof. Antonio Sérgio Coelho, Dr.
Universidade Federal de Santa Catarina

Prof. Edson Tadeu Bez, Dr.
Universidade do Vale do Itajaí

Prof. Edwin Vladimir Cardoza Galdamez, Dr.
Universidade Estadual de Maringá

Prof. Ricardo Villarroel Dávalos, Dr.
Universidade Federal de Santa Catarina

Este trabalho é dedicado a minha
esposa Silvana e aos meus filhos Jaime
e Gustavo.

AGRADECIMENTOS

Agradeço a Deus em primeiro lugar pela sabedoria e pelas oportunidades que me tem agraciado.

A minha esposa Silvana e meu filho Jaime que tiveram paciência nos momentos que estive ausente para conclusão do presente trabalho.

A minha sogra, Dona Iracema Maria Quintilhano, por ter cuidado do meu filho nos momentos que precisei estudar.

A minha orientadora, Prof^ª Mirian Buss Gonçalves, pelos ensinamentos e confiança em mim depositada.

Ao Prof^º Antonio Cézar Bornia pela confiança e apoio com relação a minha situação acadêmica, enquanto Coordenador do Curso de Pós-Graduação do PPGE/UFSC.

À Rosimeri Maria de Souza, secretária do PPGE/UFSC, pela atenção e presteza.

Ao Prof^º. Antonio Galvão Novaes pela confiança na importância do tema e objetivo do trabalho e apoio no desenvolvimento da tese.

Aos Professores Antonio Sérgio Coelho, Edwin Cardoza Galdamez, Ricardo Dávalos e Edson Tadeu Bez pelas contribuições para com o trabalho.

A todos os colegas de profissão da Universidade Tecnológica Federal do Paraná, Câmpus de Apucarana e Londrina que apoiaram minha pesquisa até a sua conclusão.

RESUMO

Nos últimos anos, a logística se tornou fundamental para o sucesso nos negócios empresariais, pois ela deve otimizar o custo de transporte e produção. Neste contexto, a armazenagem propiciou a possibilidade das empresas atuarem em regiões cada vez mais distantes. Diante desta nova concepção, torna-se necessário que os gestores viabilizem uma melhor estratégia de operação para aumentar a produtividade de seus armazéns, buscando a redução do custo logístico total. Assim, o objetivo desta tese é apresentar um modelo matemático para o dimensionamento da área de armazenagem em um armazém, através de estruturas porta paletes. Este modelo contempla armazéns com equipamentos de movimentação mecanizados, sendo empilhadeiras a combustão ou elétricas. Através do conceito de custos de aquisição, construção e de operação, o modelo otimiza a melhor solução entre horizontalizar e ou verticalizar o armazém. Várias simulações foram realizadas considerando a alteração dos equipamentos de movimentação, o custo do terreno e a quantidade de posições paletes, para verificar a influência destes na verticalização e ou horizontalização do armazém. Pode ser observado através dos resultados das simulações, que o modelo fornece redução de custos quando comparado a leiautes padrões de armazéns, demonstrando qual a melhor disposição das estruturas de armazenagem, indicando o quanto deve horizontalizar e ou verticalizar estas. Através deste modelo, os gestores possuem maior subsídio para tomarem decisões em relação à construção de novos armazéns, otimizando assim o capital investido e seus respectivos custos de operação.

Palavras-chave: Logística, Armazenagem, Leiaute, Otimização Matemática.

ABSTRACT

In recent years, logistics has become essential for success in business affairs, because it has the task to optimize the cost of transportation and production. In this context, storage led to the possibility that companies act in more distant regions. Faced with this new conception, it becomes necessary that managers make possible a better operating strategy to increase the productivity of their warehouses, focusing on the reduction the total logistics cost. The objective of this thesis is to present a mathematical model for the design of the storage area in a warehouse, through racking. This model includes warehouses with mechanized handling equipment, being combustion and electric forklifts. Through the concept of cost of acquisition, construction and operation, the model optimizes the best compromise between the horizontalization and or verticalization the warehouse. Several simulations were performed considering the change of handling equipment, the cost of land and the number of pallet positions, to evaluate their influence in the verticalization and or horizontalization of the warehouse. Can be observed through the results of the simulations, that the model provides cost savings when compared to standard layouts warehouses, demonstrating what the best arrangement of storage structures, indicating how much to horizontalize and or verticalize these. Through this model, managers have greater subsidy to make decisions relating to the construction of new warehouses, thereby optimizing the invested capital and their operating costs.

Keywords: Logistics, Warehousing, Layout, Mathematical optimization.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 - Estágios da Cadeia de Suprimentos.....	27
Figura 2 - Cadeia de Suprimentos.....	28
Figura 3 - Matriz de custos logísticos em relação ao PIB	31
Figura 4 - Custo total de produção.....	32
Figura 5 - Efeito no custo logístico total.....	38
Figura 6 - Vista superior de um armazém típico.....	41
Figura 7 Movimentação de materiais dentro das instalações.....	52
Figura 8 Paleteira elétrica e manual.....	55
Figura 9 Empilhadeira a combustão e elétrica	55
Figura 10 Empilhadeiras Bilateral, Trilateral e Retrátil	56
Figura 11 Proporção entre dimensões no armazém	65
Figura 12 Cortes nos limites do terreno e dos armazéns.....	67
Figura 13: Coordenadas dos locais de armazenagem perante o ponto de partida e chegada (P/C)	74
Figura 14 Sequencia Heurística para Alocação de Itens.	77
Figura 18 Modelo do armazém com as notações para o modelo matemático	79
Figura 19 Modelo padrão “ <i>Particle Swarm</i> ”	81
Figura 20 Disposição típica de um armazém	92
Figura 21 Sistema de armazenagem convencional	92
Figura 22 Sistema duplo de armazenagem	93
Figura 23 Notação das dimensões do Palete.....	94
Figura 24 Medidas frontais do porta-paletes com suas respectivas folgas.....	95
Figura 25 Vista lateral dos sistemas de armazenagem.....	96
Figura 26 O armazém no plano tridimensional.....	97
Figura 27 Notações para o cálculo das distâncias na horizontal	99
Figura 28 Armazém fictício.....	101
Figura 29 Notações para a proporção das estruturas de armazenagem	102
Figura 30 Visão Geral do AIMMS	136
Figura 31 Tela do AIMMS com a programação completa.....	137
Figura 32 Configuração do Armazém para o <i>Stacker</i> com 200 posições sem alteração no custo do terreno	142
Figura 33 Leiaute do Armazém para a Empilhadeira a Combustão com 200 conjuntos e custo padrão do terreno.....	144
Figura 34 Leiaute do Armazém para a Empilhadeira Elétrica com 200 conjuntos e custo padrão do terreno	147
Figura 35 Leiaute do Armazém para a Empilhadeira Retrátil com 200 conjuntos e custo padrão do terreno	150
Figura 36 Leiaute do Armazém para a Empilhadeira Bilateral com 200 conjuntos e custo padrão do terreno.....	151
Figura 37 Leiaute do Armazém para a Empilhadeira Trilateral com 200 conjuntos e custo padrão do terreno.....	154
Figura 38 Modelo provável de um armazém sem a utilização da otimização..	157
Figura 39 Leiaute aproximado do modelo proposto considerando 200 conjuntos e para o <i>Stacker</i>	158

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 Vantagens e Desvantagens dos sistemas de armazenagem.	50
Tabela 2 Comparativo entre sistemas de Armazenagem	51
Tabela 3 Características dos equipamentos de movimentação	58
Tabela 4 Pesquisas acadêmicas levantadas e relacionadas ao tema da tese.....	64
Tabela 5 Quantidade de posições paleta a serem simuladas	110
Tabela 6 Dimensões dos componentes das estruturas de armazenagem.....	111
Tabela 7 Folgas necessárias para acondicionamento do paleta.....	111
Tabela 8 Dimensões relativas a cada equipamento de movimentação.....	112
Tabela 9 Largura entre corredores para cada equipamento	112
Tabela 10 Largura do conjunto de armazenagem para cada tipo de equipamento de movimentação.....	113
Tabela 11 Altura entre níveis para cada equipamento de movimentação	114
Tabela 12 Distância entre dois conjuntos de armazenagem separados pelo corredor de passagem (<i>Dccp</i>)	114
Tabela 13 Distância inicial percorrida na porta de entrada até o primeiro corredor de passagem (<i>a</i>).....	115
Tabela 14 Espaço horizontal ocupado pelo conjunto de armazenagem e seu respectivo corredor.....	115
Tabela 15 Parâmetros de Velocidade dos Equipamentos de Movimentação ...	116
Tabela 16 Velocidade média dos equipamentos em duas empresas consultadas	117
Tabela 17 Taxa de eficiência dos equipamentos de movimentação obtidos em duas empresas consultadas	117
Tabela 18 Custo médio do terreno por metro quadrado.....	118
Tabela 19 Variação no custo do terreno para simulação	118
Tabela 20 Custo de construção por metro quadrado nas empresas pesquisadas	119
Tabela 21 Custos do conjunto de armazenagem e custos adicionais de elevação	120
Tabela 22 Custos de aquisição dos equipamentos de movimentação	120
Tabela 23 Custos de operação do equipamento de movimentação	121
Tabela 24 Quantidade de conjuntos de armazenagem a serem simulados.....	122
Tabela 25 Limitação dos índices I e J das variáveis pela proporcionalidade...	123
Tabela 26 Valores máximos a serem considerados pelos índices I e J da variável de decisão	123
Tabela 27 Alcance máximo em altura relativo ao nível de armazenagem pelo equipamento de movimentação	124
Tabela 28 Número de variáveis a serem introduzidas no modelo.....	125
Tabela 29 Resumo dos parâmetros para cálculo da distância horizontal	125
Tabela 30 Distância percorrida na vertical pelo equipamento de movimentação	126
Tabela 31 Custo da movimentação horizontal.....	127
Tabela 32 Custo da movimentação vertical	128

Tabela 33 Custos do deslocamento na vertical	128
Tabela 34 Custos de Construção do Prédio	130
Tabela 35 Custo do terreno para qualquer posição horizontal	130
Tabela 36 Custos da estrutura do conjunto de armazenagem	131
Tabela 37 Custos adicionais para elevar o nível das estruturas de armazenagem	131
Tabela 38 Parâmetros para o cálculo dos coeficientes da função objetivo	132
Tabela 39 Identificação na planilha eletrônica dos resultados para cada simulação	139
Tabela 40 Identificação das planilhas eletrônicas de simulação	140
Tabela 41 Percentual de ocupação dos níveis para o <i>Stacker</i>	141
Tabela 42 Resultados da Função Objetivo para o <i>Stacker</i>	142
Tabela 43 Variação na Função Objetivo em relação ao custo padrão do terreno	143
Tabela 44 Percentual de ocupação dos níveis para a Empilhadeira a Gás	144
Tabela 45 Resultados da Função Objetivo para a Empilhadeira a Combustão	145
Tabela 46 Variação na Função Objetivo em relação ao custo padrão do terreno	145
Tabela 47 Percentual de ocupação dos níveis para a Empilhadeira Elétrica.....	146
Tabela 48 Resultados da Função Objetivo para a Empilhadeira Elétrica.....	147
Tabela 49 Variação na Função Objetivo em relação ao custo padrão do terreno	148
Tabela 50 Percentual de ocupação dos níveis para a Empilhadeira Retrátil	149
Tabela 51 Percentual de ocupação dos níveis para a Empilhadeira Retrátil	150
Tabela 52 Variação na Função Objetivo em relação ao custo padrão do terreno	150
Tabela 53 Percentual de ocupação dos níveis para a Empilhadeira Bilateral ..	152
Tabela 54 Percentual de ocupação dos níveis para a Empilhadeira Bilateral ..	153
Tabela 55 Variação na Função Objetivo em relação ao custo padrão do terreno	153
Tabela 56 Percentual de ocupação dos níveis para a Empilhadeira Trilateral ..	155
Tabela 57 Percentual de ocupação dos níveis para a Empilhadeira Trilateral ..	156
Tabela 58 Variação na Função Objetivo em relação ao custo padrão do terreno	156
Tabela 59 Nomenclatura dos arquivos na Pasta “Simulação Aleatória”	159
Tabela 60 Detalhamento dos planos de trabalho nas planilhas eletrônicas	159
Tabela 61 Possíveis leiaute para o modelo aleatório.....	159
Tabela 62 Comparativo entre o Modelo Proposto e o Modelo Aleatório para o <i>Stacker</i>	160
Tabela 63 Possíveis leiaute para o modelo aleatório.....	161
Tabela 64 Comparativo entre o Modelo Proposto e o Modelo Aleatório para a Empilhadeira a Combustão	162
Tabela 65 Comparativo entre o Modelo Proposto e o Modelo Aleatório para a Empilhadeira Elétrica	163
Tabela 66 Possíveis leiaute para o modelo aleatório.....	164

Tabela 67 Comparativo entre o Modelo Proposto e o Modelo Aleatório para a Empilhadeira Retrátil.....	165
Tabela 68 Possíveis leiaute para o modelo aleatório	165
Tabela 69 Comparativo entre o Modelo Proposto e o Modelo Aleatório para a Empilhadeira Bilateral.....	166
Tabela 70 Comparativo entre o Modelo Proposto e o Modelo Aleatório para a Empilhadeira Trilateral.....	167

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

AIMMS - um acrônimo para *Advanced Interactive Multidimensional Modeling System* – Sistema Avançado Interativo de Modelagem Multidimensional;
CD – Centro de Distribuição;
CD-Dados - Disco eletrônico contendo os arquivos referentes à tese;
COI - *Cube per Order Index* (Indexação pelo Volume dos Pedidos;
FIFO – *First in First Out* (Primeiro que Entra é o Primeiro que Sai);
GLP – Gás Liquefeito de Petróleo;
GUI - Interface Gráfica ;
LEC – Lote Econômico de Compras;
LIFO – *Last in First Out* (Último que Entra é o Primeiro que Sai);
P/C - Ponto de Partida e Chegada ao Armazém, normalmente refere-se à porta de entrada;
PIB - Produto interno bruto;

LISTA DE VARIÁVEIS

A: Custo por ordem de reposição de pedidos;
a: distância da porta de entrada e saída até o primeiro corredor de *picking*;
A1: profundidade do edifício;
a2: Largura do Box de armazenagem;
Ac: altura da carga;
ACusto: Custo em unidade de área durante o período planejado. Este custo refere-se à depreciação no período;
Al: Altura da longarina.
AL: largura das ilhas de armazenagem;
AL: largura das ilhas de armazenagem;
Aleatório: Numero aleatório;
Ap: altura do palete;
AREA: área horizontal do projeto, que é assumida como constante durante o horizonte de planejamento;
AW: comprimento das ilhas de armazenagem;
b: dimensões entre dois conjuntos separados pelo corredor de *picking*;
B: profundidade total do armazém ;
b1: Largura do corredor principal de passagem;
B1: Largura do edifício de armazenagem;
b2: largura do Box de acumulação de carga;
C: conjunto de armazenagem contendo q paletes;
c: largura do corredor de circulação interna;
CA: custo de aquisição do sistema de armazenagem;
CAA: custo para a abertura de um armazém;
Cah: Custo do sistema de armazenagem horizontal;
CAW: largura do corredor principal de passagem;
CC: custo da construção civil;
Cca: Custo por m^2 de área construída;
CCh: custo de construção inicial do armazém para a horizontal;
CCustom: custo de uma estante do tipo m. Este custo é relativo a sua depreciação no período avaliado;
CCv: custo de construção inicial do armazém para a vertical;
CDmd: profundidade de uma estante de armazenagem;
CDmw: largura da estante de armazenagem do tipo m;
Ceq: custo do equipamento de movimentação;
CFo: custos fixos de operação do armazém;
Ci: Fator de inércia;
Cj: Custo unitário do item j ;
CM : custo de aquisição do sistema de movimentação;
Cmsa: Custo do conjunto de armazenagem considerando sua respectiva capacidade.
Cmsv: incremento de custo para cada nível vertical adicionado;

CO: custo da operação do armazém;
Coe: Custo de operação mensal do equipamento de movimentação, incluindo mão de obra e consumíveis do equipamento;
Co_h: custos de operação a horizontal;
Co_v: custos de operação para a vertical;
CP: custos de construção do prédio;
Cph: Custo de construção do prédio na horizontal
Cpp: Largura do corredor principal de passagem;
CT: custo do terreno;
Ctm: Custo do terreno por m²;
CVCm: capacidade volumétrica de uma estante de armazenagem;
CVo: custos variáveis de operação do armazém;
CWCm: capacidade em peso de uma estante de armazenagem;
d: depreciação em meses para o equipamento adquirido;
Dccp: dimensão entre duas estruturas de armazenagem que são separadas pelo corredor de *picking*;
DCustol: custo do compartimento *l* (gaveta, caixa, etc.) de armazenagem na estante;
dh: distância horizontal percorrida;
D_{ijk}: demanda fixa para todas as posições;
dj: Frequência média de ordens para o item *j* (transações / período);
D_{lk}: distância horizontal da célula *k* no nível *l* para o local de entrada/saída ou elevador;
DVCl: capacidade volumétrica de um compartimento de armazenagem;
DWCl: capacidade em peso de um compartimento de armazenagem;
Ecs_{ij}: espaço em m² para cada conjunto e seu sistema para qualquer posição horizontal (*i, j*);
ECusto: custo médio por funcionário durante o período de planejamento;
EPR: taxa média de separação por funcionário durante o período planejado;
ET: tempo médio de retirada de um item do compartimento de armazenagem;
fa: Folga entre a carga e a longarina do próximo nível; e
fc: folga entre os paletes que estão posicionados;
fp: Folga entre paletes e paletes-colunas;
H: Altura total do sistema;
He : Altura entre níveis;
ht: horizonte de tempo em que estes custos operacionais serão validados
I: Taxa de manutenção dos estoques (%);
iterMax: número máximo de inércias;
l: largura de um conjunto de armazenagem;
L: largura total do armazém;
Lc: Largura do conjunto de armazenagem;
Lcl: Largura da coluna da estrutura;
Lcp: Largura do corredor de *picking*;
Lec: Largura entre corredores;
Lp: Largura de cada paleta na posição de armazenagem;

M: número de posições de desembarque na plataforma A;
m: numero total dos espaços de armazenagem;
Mli: inventário máximo da peça, expresso em unidades;
n: sistema convencional ou sistema duplo de armazenagem;
NA: variável decisão relativa ao número de ilhas paralelas no projeto;
n_{cp}: número do corredor de *picking*;
NCUm: variável de decisão referente ao número de estantes do tipo *m* utilizadas;
NDUL: variável de decisão referente ao número de compartimentos de armazenagem utilizadas;
NE: número de funcionários utilizado;
Ni: Numero total de espaços para produtos do tipo *i* (classificação A, B e C);
n_j: Numero médio de produtos por pedido contendo o item *j*;
NL: número de boxes ao longo da face leste do edificio;
NN: Número de boxes de armazenagem;
NO: número médio de pedidos por período de tempo;
np: número de paletes entre colunas (suportado pela longarina);
NS: Número de boxes na face sul do edificio;
Nv: Número de variáveis do modelo;
OTT: tempo de deslocamento esperado para o *picking* *P*: número de posições paletes necessárias para armazenagem;
Pca: profundidade do conjunto de armazenagem;
Pi: Probabilidade de ocorrer uma ordem para produtos do tipo *i* (classificação A, B e C);
Pp: Profundidade do paleta;
Q: quantidade ideal de posições paletes necessárias para o armazém;
S: Largura da área administrativa;
Te: taxa de eficiência do equipamento de movimentação;
tmd: tempo máximo disponível para operação no mês;
Tu: Distância média no eixo horizontal;
Tv: Distância média no eixo vertical;
U: comprimento do armazém;
u: comprimento total do armazém;
V: largura do armazém;
Vi: volume de uma unidade da peça, expressa em metro cúbico por unidade;
vmdh: velocidade média de deslocamento horizontal;
vmdv: velocidade média de deslocamento na vertical;
VUF: fator de utilização de volume, que é calculada através da razão entre o volume das peças a serem armazenadas pela capacidade volumétrica dos compartimentos de armazenagem;
w: função de inércia;
Wi: peso de uma unidade da peça, expressa em quilogramas;
w_{max}: força inicial da inércia;
w_{min}: força de inércia mínima;

WS : velocidade de deslocamento do funcionário ao longo dos corredores, expressa em unidades de comprimento por tempo;

$X_{c,l,j}$: Variável de decisão do produto j armazenado nas coordenadas $(c;l)$ sendo seu resultado 0 ou 1;

x_{ijk} : se 1, existirá o conjunto de armazenagem no estante i , conjunto j e nível k , contendo q paletes; e 0 caso contrário;

x_{jlk} : variável de decisão; se igual a 1, o item j é armazenado na célula k no nível l ; se for 0, ao contrário;

z : Custo total de construção e operação do armazém.

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO.....	27
1.1	OBJETIVOS	30
1.1.1	<i>Objetivo Geral.....</i>	<i>30</i>
1.1.2	<i>Objetivos Específicos.....</i>	<i>30</i>
1.2	JUSTIFICATIVA.....	30
1.3	MÉTODO DE TRABALHO	33
1.4	LIMITAÇÕES DO TRABALHO	34
1.5	ESTRUTURA DO TRABALHO	34
2	REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	37
2.1	INTRODUÇÃO A ARMAZENAGEM	37
2.2	FUNDAMENTOS E IMPORTÂNCIA DA ARMAZENAGEM.....	37
2.2.1	<i>Necessidade de Espaço Físico</i>	<i>37</i>
2.3	PRINCÍPIOS E FUNÇÕES DA ARMAZENAGEM	39
2.3.1	<i>Funções dos Armazéns</i>	<i>40</i>
2.3.2	<i>Tipos de Depósitos.....</i>	<i>43</i>
2.4	DESAFIOS DA ARMAZENAGEM MODERNA.....	45
2.5	SISTEMAS DE ARMAZENAGEM.....	46
2.5.1	<i>Estruturas do tipo Porta Paletes.....</i>	<i>48</i>
2.5.2	<i>Ocupação X Seletividade: A melhor escolha do sistema.....</i>	<i>49</i>
2.6	EQUIPAMENTOS DE MOVIMENTAÇÃO	51
2.6.1	<i>Leis da Movimentação de Materiais.....</i>	<i>52</i>
2.6.2	<i>Equipamentos de Movimentação</i>	<i>54</i>
2.6.3	<i>Seleção de Equipamentos</i>	<i>56</i>
2.7	MOVIMENTAÇÃO E LOCALIZAÇÃO DE MATERIAIS.....	58
2.7.1	<i>Sistemas de Picking.....</i>	<i>59</i>
2.8	LEIAUTE NA ARMAZENAGEM	62
2.8.1	<i>Design de Armazéns</i>	<i>65</i>
2.8.2	<i>Alocação de Itens em Estruturas Existentes;</i>	<i>72</i>
2.8.3	<i>Alocação Através de Políticas de Picking.....</i>	<i>78</i>
2.8.4	<i>Movimentação de Materiais</i>	<i>83</i>
2.8.5	<i>Alocação de Itens Blocados</i>	<i>84</i>
2.8.6	<i>Alocação de Itens em Armazéns multi níveis.....</i>	<i>84</i>
2.8.7	<i>Configuração dos corredores de acesso</i>	<i>86</i>
3	MODELO PROPOSTO.....	89

3.1 CONSIDERAÇÕES INICIAIS	89
3.2 CONSIDERAÇÕES INICIAIS DE CUSTOS	90
3.3 DEFINIÇÃO DA QUANTIDADE DE POSIÇÕES PALETES.....	91
3.4 ESCOLHA DO TIPO DE ESTRUTURA	92
3.5 DIMENSÕES DAS ESTRUTURAS	93
3.6 CÁLCULO DAS DISTÂNCIAS PERCORRIDAS	96
3.7 DEFINIÇÃO DAS VARIÁVEIS DE DECISÃO	100
3.8 DEFINIÇÃO DO MODELO MATEMÁTICO	103
3.9 CONSIDERAÇÕES DE CUSTOS.....	105
4 DIMENSIONAMENTO DE ARMAZÉNS COM ESTRUTURAS PORTA PALETES	109
4.1 CONSIDERAÇÕES INICIAIS	109
4.2 LEVANTAMENTO DAS DIMENSÕES DAS ESTRUTURAS DE ARMAZENAGEM	110
4.3 LEVANTAMENTO DAS VELOCIDADES DOS EQUIPAMENTOS DE MOVIMENTAÇÃO	116
4.4 LEVANTAMENTO DOS CUSTOS ENVOLVIDOS.....	117
4.5 ATRIBUIÇÃO DO NÚMERO DE VARIÁVEIS	121
4.6 CÁLCULO DO DESLOCAMENTO DOS EQUIPAMENTOS DE MOVIMENTAÇÃO	125
4.7 COMPOSIÇÃO DOS CUSTOS DE OPERAÇÃO	126
4.8 COMPOSIÇÃO DOS CUSTOS DE CONSTRUÇÃO.....	129
4.9 COMPOSIÇÃO DOS COEFICIENTES DAS VARIÁVEIS	132
5 SIMULAÇÃO DO MODELO PROPOSTO.....	135
5.1 PROGRAMAÇÃO DO AIMMS	136
5.2 SIMULAÇÃO DOS CENÁRIOS.....	138
5.2.1 Resultados e Análises da Simulação para o Stacker	140
5.2.2 Resultados e Análise da Simulação para a Empilhadeira a Combustão.....	143
5.2.3 Resultados e Análise da Simulação para a Empilhadeira Elétrica	145
5.2.4 Resultados e Análise da Simulação para a Empilhadeira Retrátil	148
5.2.5 Resultados e Análise da Simulação para a Empilhadeira Bilateral	151
5.2.6 Resultados e Análise da Simulação para a Empilhadeira Trilateral	153

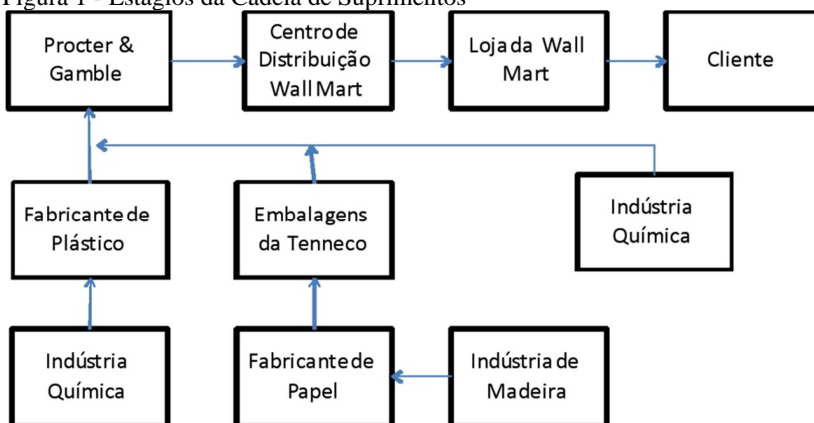
5.3 COMPARAÇÃO ENTRE CENÁRIOS ALEATÓRIOS E CENÁRIOS SIMULADOS	156
5.3.1 <i>Simulação Aleatória para o Stacker</i>	159
5.3.2 <i>Simulação Aleatória para a Empilhadeira a Combustão</i>	161
5.3.3 <i>Simulação Aleatória para a Empilhadeira Elétrica</i>	162
5.3.4 <i>Simulação Aleatória para a Empilhadeira Retrátil</i>	163
5.3.5 <i>Simulação Aleatória para a Empilhadeira Bilateral</i>	165
5.3.6 <i>Simulação Aleatória para a Empilhadeira Trilateral</i>	167
5.3.7 <i>Análise dos Resultados</i>	168
6 CONCLUSÃO	171
REFERÊNCIAS	175
APÊNDICE A – RELAÇÃO DE AUTORES E O FOCO DA PESQUISA COM RELAÇÃO ÀS VARIÁVEIS DE DECISÃO NOS PROJETOS DE ARMAZENAGEM	187
APÊNDICE B – OUTRAS ESTRUTURAS DE ARMAZENAGEM	188
APÊNDICE C – OUTROS EQUIPAMENTOS DE MOVIMENTAÇÃO	195
APÊNDICE D – OUTROS EQUIPAMENTOS DE MOVIMENTAÇÃO	199
APÊNDICE E – MODELOS UTILIZADOS NAS PESQUISAS LEVANTADAS...	206
APÊNDICE F – FORMULÁRIO PARA O LEVANTAMENTO DO CUSTO DO TERRENO	207
APÊNDICE G – FORMULÁRIO PARA OS PARÂMETROS DAS ESTRUTURAS DE ARMAZENAGEM	208
APÊNDICE H – FORMULÁRIO PARA O LEVANTAMENTO DOS CUSTOS DE CONSTRUÇÃO	209
APÊNDICE I – FORMULÁRIO PARA OS PARÂMETROS DOS EQUIPAMENTOS DE MOVIMENTAÇÃO	210
APÊNDICE J – CD-DADOS ANEXO	211

1 INTRODUÇÃO

A logística é um conjunto de atividades que são repetidas muitas vezes ao longo da cadeia de suprimentos, onde as matérias primas são convertidas em produtos que agregam valor para os clientes. Entretanto, frequentemente a fonte das matérias primas, as fábricas processadoras e os clientes estão em localizações geográficas diferenciadas, obrigando outros intermediários a participarem do processo de fornecimento, até o cliente final (BALLOU, 2001; BAKER & CANESSA, 2009).

Uma típica formação de uma cadeia de suprimentos pode ser vista na figura 1. Ela demonstra a particularidade da movimentação de matérias primas, subprodutos e produtos até o cliente final.

Figura 1 - Estágios da Cadeia de Suprimentos



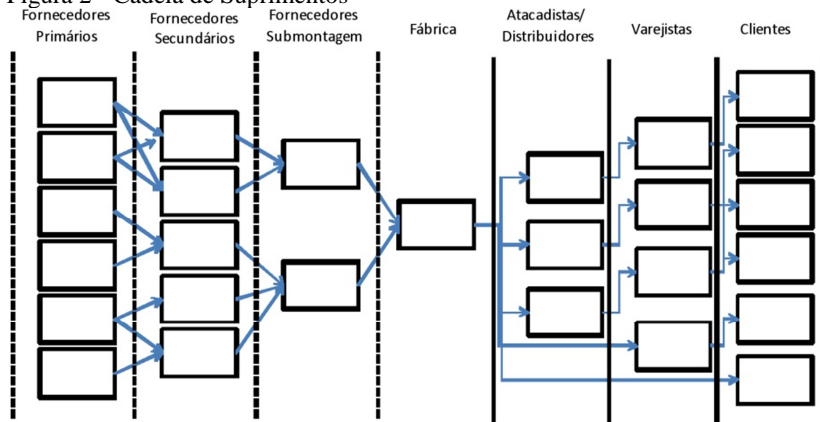
Fonte: Chopra & Meindl (2004)

Assim, fica evidente a necessidade de transportar matérias primas, produtos e subprodutos entre as localizações geográficas. Do início da cadeia de suprimentos até o processamento, o transporte é realizado em veículos com carga completa, fazendo assim o uso da produtividade e economia no transporte. Entretanto, após o processamento, o fabricante deve enviar seus produtos a vários intermediários, para que estes disponibilizem os produtos próximos aos clientes consumidores. Estes intermediários são chamados de Atacadistas/ Distribuidores e Varejistas, e fazem parte do Canal de Distribuição (CHOPRA & MEINDL, 2004; CANEN & WILLIAMSON, 1996).

O Canal de Distribuição é conhecido como sendo a estrutura de intermediários que leva o produto até o cliente final. Em países de grandes dimensões, esta distribuição necessita muitas vezes de vários parceiros e intermediários, para que produtos de massa possam ser disponibilizados nos pontos de venda (BOWERSOX & CLOSS, 2001; CHIEN, 2004).

A figura 2 demonstra a inter-relação entre os fornecedores primários, secundários, fábrica e intermediários de distribuição.

Figura 2 - Cadeia de Suprimentos



Fonte: Adaptado de Taylor (2005)

Cada um destes elos é caracterizado por movimentações distintas de matérias primas, produtos, subprodutos e componentes. Portanto, é natural que sejam formados estoques entre estes, para absorver diferenças entre fornecimento e demanda (TAYLOR, 2005).

Quanto mais próximo do cliente estiver o produto, mais fracionada tende a ser a carga. Pode-se observar na figura 2, que após a fabricação do produto, existe um aumento de locais a serem entregues. Assim, a otimização do transporte é dificultada neste contexto.

Para reduzir estes impactos, os fabricantes, grandes atacadistas e ou varejistas, utilizam-se de armazéns que são denominados de centros de distribuição, para aproveitarem a consolidação de pedidos e enviá-las para os pontos de venda e ou cliente final (BANZATO *et. al*, 2003; BHASKARAN & MALMBORG, 1989).

Estas atividades ficaram mais evidentes após a estabilização da moeda brasileira. Equipamentos, áreas de armazenagem, mão de obra, administração da informação, são de extrema importância na

movimentação, armazenagem e distribuição de materiais e produtos, tornando assim, essas atividades muito intensivas em capital (FLEURY & RIBEIRO, 2003).

Assim começou a figurar neste cenário a utilização de operadores logísticos, que assumem a responsabilidade de movimentar, armazenar e distribuir materiais e produtos. Com a especialização destes operadores nas atividades, e a partilha de custos entre os usuários (fabricantes), foi possível reduzir os custos operacionais da logística (FLEURY & RIBEIRO, 2003; LAM *et al.*, 2011).

A partir deste novo cenário, centros de distribuição (CD) são criados e utilizados como pulmão para otimizar e consolidar pedidos de clientes. Nos últimos anos, os fabricantes, grandes redes de varejo e operadores logísticos utilizam-se cada vez mais destes centros de distribuição para reduzir custos de movimentação e distribuição (LIMA, 2006).

Entretanto, uma consideração a se fazer, é que estes centros de distribuição, necessitam de alta produtividade para que seus custos operacionais não invalidem a estratégia de redução do custo de frete (LIMA, 2006; ROODBERGEN & VIS, 2006).

Para obter esta alta produtividade, desde o início do projeto do armazém devem-se considerar os seguintes requisitos: localização do armazém, tamanho do armazém, seleção de equipamentos de movimentação, seleção de equipamentos de armazenagem, leiaute das estruturas, estratégia de *picking* (separação de pedidos). Através destes requisitos, deve-se obter a melhor ocupação do espaço, sem perder a seletividade dos produtos, conquistando assim a melhor produtividade através do leiaute (RUBRICO *et al.*, 2008; GU *et al.*, 2010).

No requisito do leiaute, várias são as decisões que devem ser tomadas e podem afetar o desempenho do armazém. Por exemplo, como deverá ser armazenado o estoque, em que tipo de estrutura, qual equipamento de movimentação, número de corredores de acesso, portas de entrada e saída, orientação dos corredores, largura e comprimento dos corredores, entre outros. Estes problemas na decisão do leiaute afetam o desempenho do armazém com relação a seus custos de manutenção, custos de movimentação de materiais, capacidade de armazenamento, utilização do espaço e utilização dos equipamentos (DESHPANDE *et al.*, 2007; GU *et al.*, 2010).

Atualmente, estas decisões são empíricas e baseadas na experiência do gestor do armazém. Em muitas situações estas decisões podem estar equivocadas e um alto investimento pode ter sido feito de forma inadequada. Pouco estudo científico pode ser encontrado na

literatura relativo ao dimensionamento da armazenagem, dificultando ainda mais a idealização de projetos de novas estruturas por parte das empresas. A grande maioria das pesquisas destina-se a alocar os produtos em estruturas já existentes. Em alguns casos, as pesquisas destinadas ao leiaute limitam-se a apenas dispor as estruturas em um plano para visualização, sem se preocuparem com a produtividade da operação.

Neste contexto, verifica-se a importância de trabalhos que busquem dimensionar os armazéns, já no seu projeto, de forma a otimizar sua operação, considerando variáveis de custos envolvidos na construção e operação destes, indicando qual o melhor leiaute desta área de armazenagem, se verticalizados e ou horizontalizados.

1.1 OBJETIVOS

1.1.1 Objetivo Geral

Este trabalho tem como objetivo desenvolver um modelo matemático para o dimensionamento de armazéns com estruturas porta-paletes com o intuito de fornecer subsídios necessários para a tomada de decisão em projetos de armazenagem.

1.1.2 Objetivos Específicos

Como objetivos específicos têm-se:

- Desenvolver um modelo matemático através da otimização que auxilie na decisão entre verticalizar ou horizontalizar as estruturas porta-paletes de armazenagem;
- Desenvolver uma estrutura de custeio das operações de armazenagem;
- Simular o modelo em cenários distintos;
- Demonstrar e avaliar os resultados através dos custos totais de operação;
- Elaborar análises através das simulações.

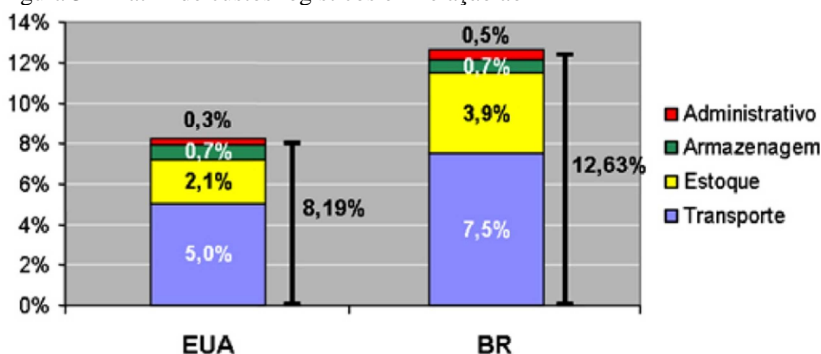
1.2 JUSTIFICATIVA

A principal função da armazenagem é a guarda física de produtos. Entretanto, a armazenagem estratégica permite a utilização deste para consolidar e prestar serviços a diferentes fornecedores, e entregar

mercadorias a clientes únicos com custos compatíveis (BOWERSOX & CLOSS, 2001).

Ao observar a matriz de custos logísticos, Lima (2006), aponta uma grande diferença entre estes custos no Brasil e nos Estados Unidos (Figura 3).

Figura 3 - Matriz de custos logísticos em relação ao PIB



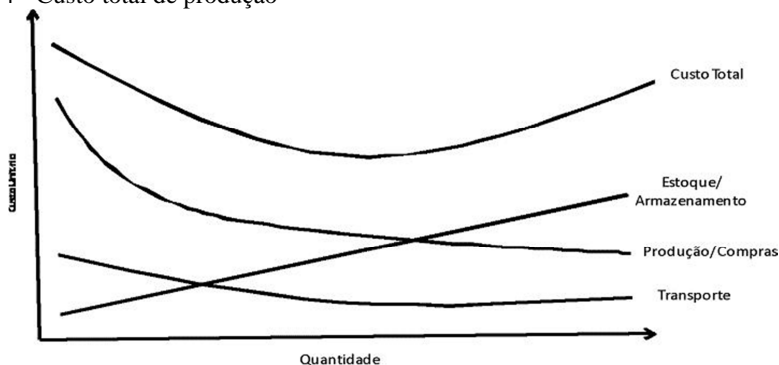
Fonte: Lima (2006)

Além da grande diferença entre os custos totais entre Brasil (12,63% do PIB) e Estados Unidos (8,19% do PIB), a figura 3 mostra que, no Brasil, custo de transporte representa ainda um custo extremamente alto, se comparado aos outros. Isto é explicado por dois motivos (LIMA, 2006): Primeiro, o principal modal de transporte no Brasil é o Rodoviário, onde estão os maiores custos operacionais; e segundo, a grande dimensão do Brasil, força fabricantes a levarem produtos a extremos em termos de localização.

Além disso, avaliando-se a o gráfico de custo total na figura 4, pode-se observar que as linhas de Estoque/Armazenamento e Transporte possuem uma interseção que determina a quantidade ideal entre os dois custos. Assim, quanto maior a eficiência do armazém tende-se a modificar a localização desta interseção, podendo assim movimentar maiores quantidades de carga, com menores custos.

Assim, esta pesquisa é justificada pelo fato de que os armazéns devem possuir a produtividade necessária para equilibrar estes custos de estoques e transporte. Ao se aumentar a produtividade do armazém, possibilita-se uma maior movimentação na quantidade de carga, reduzindo o custo com frete (qual é mais incidente no Brasil).

Figura 4 - Custo total de produção



Fonte: Bowersox *et al.* (2007)

Em paralelo, o antigo sistema de produção e distribuição em massa, não é mais contemplado, principalmente devido à customização dos produtos, forçando as empresas a administrarem cada vez mais um inventário diversificado, aumentando assim a importância da armazenagem no sistema logístico (HENNEBERRY, 1987; POWER *et al.*, 2007).

Outro fator que aumentou a importância da armazenagem na logística nos últimos anos foi a crescente utilização das compras on-line, forçando fabricantes e distribuidores a tornar este processo de colocação de pedido e entrega ao cliente final, algo mais eficiente e produtivo (BROWN, 1990; LINDLEY *et al.*, 2008).

Quando analisada a literatura pesquisada nesta tese (Apêndice A), verifica-se que quase não há pesquisa em relação às decisões de leiaute (verticalizar e ou horizontalizar a estrutura). Boa parte destas pesquisas apenas aloca os produtos dentro de uma estrutura existente, encontrando o menor custo de movimentação. Entretanto, não seria interessante avaliar qual seria o benefício em encontrar a melhor disposição destas estruturas no plano vertical e horizontal e por consequência encontrar a melhor disposição destes itens?

Sendo assim, a importância desta pesquisa pode ser apontada tendo em vista que dentre as referências encontradas, poucas delas preocupam-se com o projeto do armazém, buscando esta otimização antes da construção do mesmo.

1.3 MÉTODO DE TRABALHO

Através da análise das várias abordagens que poderiam ser utilizadas para o problema proposto, observou-se que a mais adequada é a do experimento através da modelagem e simulação de cenários.

A principal característica do experimento é que o pesquisador tem o controle total sobre os valores que as variáveis independentes irão assumir, ou seja, é o pesquisador quem estabelece e controla os valores que serão experimentados. Trata-se de um método de pesquisa quantitativo, onde o objetivo do pesquisador ao fazer uso do mesmo é demonstrar, usando técnicas de análise estatísticas, as relações causais entre a variável independente e as variáveis dependentes (BRYMAN 1989).

Já a modelagem e simulação é o processo de criar e experimentar um sistema físico através de um modelo matemático computadorizado. Um sistema pode ser definido como um conjunto de componentes ou processos que se interagem e que recebem entradas e oferecem resultados para algum propósito (CHUNG, 2004).

Neste modelo a abordagem operacional de pesquisa consiste de quatro fases: conceitualização, modelagem, solução pelo modelo e implementação (BERTRAND & FRANZOO, 2002).

Na fase de conceitualização, o pesquisador cria o modelo conceitual do problema e do sistema em estudo, toma decisões sobre as variáveis que necessitam ser incluídas no modelo e sobre o escopo do problema e do modelo a serem estudados.

Na fase de modelagem, o pesquisador realmente constrói o modelo quantitativo, definindo as relações causais entre as variáveis. Na fase de solução pelo modelo, em geral, a matemática desempenha um papel determinante.

Finalmente, na fase de implementação, os resultados do modelo são implementados e um novo ciclo pode começar.

No caso da presente pesquisa, a conceitualização do problema deu-se através da revisão bibliográfica, buscando no meio científico as principais pesquisas relacionadas ao tema. A partir desta, foi possível identificar o objetivo deste trabalho que representa uma lacuna na literatura analisada.

Por sua vez a modelagem, possui o maior peso da pesquisa, sendo que o capítulo 3 apresenta o modelo proposto.

A aplicação do modelo e a implementação serão discutidas através de simulações matemáticas em ambientes computacionais, avaliando os resultados e gerando análises de sensibilidade em relação

às mudanças das variáveis. Esta aplicação do modelo pode ser vista através da metodologia de construção do modelo e simulação findando com a análise dos resultados obtidos.

1.4 LIMITAÇÕES DO TRABALHO

Existem muitas formas de se projetar um armazém com vários sistemas de armazenagem e movimentação de materiais. Não é foco deste trabalho, exaurir o tema relativo a estas variáveis. Portanto, o modelo proposto terá como foco um armazém com estruturas porta paletes e os sistemas de movimentação considerados serão as empilhadeiras elétricas e de combustão movimentadas por um operador, não estendendo o assunto a equipamentos automatizados.

O objetivo deste trabalho é projetar a melhor alocação do espaço em relação ao local de armazenagem, não sendo foco deste, apresentar variáveis de espaços relativos à *picking*, docas de carga e descarga, áreas administrativas e pátios para manobras de veículos.

O modelo apresentado também não considera a melhor alocação dos itens nos espaços armazenados, e sim, somente atribui a melhor alocação das estruturas de armazenagem, se verticalizadas e ou horizontalizadas.

Apesar das simulações realizadas, o modelo estará preparado para ser testado com qualquer variação de dados relativos a custos e dimensões das estruturas e equipamentos de movimentação, sendo possível sua utilização como meio de informação para a tomada de decisão em projetos de armazenagem.

1.5 ESTRUTURA DO TRABALHO

Este trabalho está dividido em 6 capítulos, com os conteúdos apresentados na sequência.

No primeiro capítulo é feita a introdução ao tema da tese onde é demonstrada a sua participação efetiva dentro da cadeia logística. Posteriormente apresentam-se os objetivos do trabalho e sua justificativa acerca de sua escolha. Neste capítulo, também são apresentados o método de trabalho, a limitação do estudo e a estrutura do trabalho.

No segundo capítulo é apresentada uma revisão teórica sobre o assunto. Apresentam-se os principais sistemas de armazenagem e movimentação, bem como os principais estudos relacionados à melhoria nos armazéns.

No terceiro capítulo o modelo proposto é apresentado. Suas variáveis, restrições e métodos de custeio são apresentados.

O quarto capítulo apresenta a construção do modelo baseado em uma situação proposta. Custos relacionados e dimensões são apresentados através de pesquisa de mercado.

O quinto capítulo apresenta as simulações realizadas e a análise dos resultados através das mudanças das variáveis e restrições envolvidas.

Por fim, o sexto capítulo apresenta a conclusão do trabalho, apresentando limitações, bem como sugestões para trabalhos futuros.

2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

2.1 INTRODUÇÃO A ARMAZENAGEM

O processo de armazenagem surge a partir da necessidade do homem, uma vez que percebeu que poderia guardar suprimentos em momentos de fartura para utilizá-los em momentos de escassez. Até as escritas mais antigas, como por exemplo, o livro de Gênesis, descreve a importância da guarda de produtos para evitar a escassez de alimentos (BOWERSOX *et. al*, 2007; MATSON & WITH, 1982).

Desde os tempos mais antigos, até os dias atuais, a armazenagem e a movimentação de materiais possuem papel essencial nas atividades de suprimentos. A armazenagem sempre ocorre em locais fixos, ao contrário do transporte, e pode representar um custo entre 12% a 40% do custo logístico das empresas (BANZATO *et al.*; 2003; HASSAN, 2002).

Estes custos estão intimamente associados a vários itens de projeto de um armazém, como por exemplo: localização do armazém; dimensionamento da área; layout e arranjo físico; estruturas de armazenagem e sistemas de movimentação; locais de carga e descarga; ocupação do espaço físico, etc (BALLOU; 1993; BALLOU, 2001).

2.2 FUNDAMENTOS E IMPORTÂNCIA DA ARMAZENAGEM

A armazenagem passou a ter papel de maior importância entre os séculos 19 e 20, onde ela foi muito utilizada para consolidar cargas e gerar economias de transporte. A utilização da consolidação culminou no uso frequente de atacadistas e distribuidores, que impulsionaram as relações comerciais entre os varejistas e os fabricantes (BALLOU, 1993; BHASKARAN & MALMBORG, 1989).

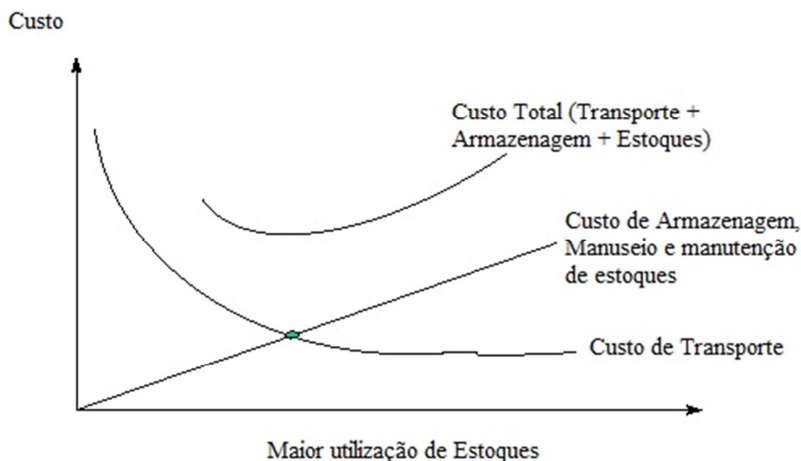
2.2.1 Necessidade de Espaço Físico

Se as demandas dos clientes fossem conhecidas com precisão e o fornecimento fosse instantâneo, teoricamente não haveria necessidade de manter espaço para o estoque. Entretanto, é necessário o estoque, para equilibrar as necessidades de oferta de mercadorias e de consumo dos clientes, uma vez que a previsão de consumo não é exata e as fábricas não atendem instantaneamente (BOWERSOX & CLOSS; 2001; SYKES & WYCOMBE, 1994).

Neste caso, os armazéns ou depósitos são justificáveis por compensarem com os custos de transporte e de produção. Podem-se enviar cargas fechadas até locais distantes e armazená-las até que os pedidos de clientes cheguem e as mesmas sejam distribuídas localmente. Da mesma forma, podem-se reduzir as incertezas das fábricas ao produzir lotes maiores armazenando-os para suprir quaisquer problemas durante a manufatura ou variação da demanda (BALLOU, 1993; FABER *et al.*, 2002).

A figura 5 representa o custo total de uma operação logística. Observa-se que, quanto maior custo de estoques e armazéns mais se reduz os custos com transporte. O ponto mais baixo da curva de custo total representa o ponto ideal entre a “quantidade de estoque X custos de transporte e produção”.

Figura 5 - Efeito no custo logístico total.



Fonte: Ballou (1993)

Segundo Ballou (1993), existem 4 razões básicas para uma organização utilizar espaço físico de armazenagem:

- Reduzir Custos de Transporte: Custos de transporte e distribuição podem ser reduzidos utilizando a armazenagem de materiais, por consolidarem cargas e existir um maior aproveitamento do frete;
- Coordenação de Suprimento e Demanda: Empresas que possuem produtos sazonais produzem o ano todo e

armazenam para reduzir custos de produção. Existem aquelas que possuem a produção sazonal, a qual se produz em determinadas épocas e são distribuídos o ano todo. Outro fator a ser considerado é a oscilação dos preços de commodities, que podem ser comprados em maior quantidade e armazenados para aproveitar uma queda nos preços;

- Necessidades de Produção: Nas empresas de manufatura, é comum armazenar produtos semi-processados, para posterior término de fabricação, como por exemplo, em uma fábrica de móveis, podem-se armazenar os componentes das mesas (pés, tampo, quadrantes, etc) para posterior montagem;
- Considerações de Marketing: A disponibilidade do produto mais próximo ao cliente, pode aumentar o nível de serviço, uma vez que é possível atendê-lo com maior rapidez. Em situações de campanhas de marketing, a disponibilidade do produto também é fator determinante.

Atualmente, ao analisar estas necessidades, pode-se concluir que a armazenagem na operação logística é a gestão econômica do espaço/ tempo necessários para manter estoques de mercadorias (BANZATO et al; 2003; SAID et al., 2010; WANKE & AFFONSO, 2010).

2.3 PRINCÍPIOS E FUNÇÕES DA ARMAZENAGEM

A armazenagem moderna possui alguns princípios em sua concepção, podendo influir diretamente na produtividade da armazenagem. Várias entidades nacionais e internacionais estabelecem os seguintes princípios (RODRIGUES; 2007, MOURA; 2004, TAYLOR; 2005, BALLOU; 2001; ZHANG & LAI, 2006):

- Planejamento: Ao verificar uma área para compra ou locação para o armazém, validar alguns pontos que propiciem efetivas condições de operação: condições de carga/ descarga; área da armazenagem, capacidade operacional de receber/armazenar/entregar considerando: peso, dimensões, características de manuseio e segurança.
- Flexibilidade operacional: Capacidade do armazém em se adaptar a condições adversas, sendo capaz de armazenar produtos de diferentes características e movimentação.

- Simplificação: Capacidade de otimizar o fluxo de entrada e saída de materiais, obtendo maior produtividade sem ocasionar gargalos.
- Integração: Integrar a maior quantidade de operações e atividades simultaneamente.
- Otimização do espaço físico: Através da correta utilização de equipamentos de movimentação e estruturas de armazenagem, promover a maior ocupação do prédio, respeitando a seletividade de produtos que se é exigido.
- Otimização de equipamentos e mão de obra: Elaborar procedimentos de operações de modo a racionalizar a ocupação de equipamentos e mão de obra.
- Verticalização: Propiciar a verticalização da armazenagem.
- Mecanização: Avaliar o custo-benefício da utilização da mecanização de mercadorias.
- Automação: a utilização da informática e equipamentos de controle de produtos deve servir para reduzir tempos de processamento na movimentação e armazenagem.
- Controle: Prever e implantar um procedimento de registros e controle das mercadorias que são recebidas, armazenadas, separadas e enviadas.
- Segurança: Adotar procedimentos que garantam a integridade física das mercadorias, equipamentos, prédio, estruturas de armazenagem e mão de obra.
- Preço: Verificar se a tarifa de armazenagem é compatível com a praticada pelo mercado, em caso negativo, o planejamento do armazém precisa ser revisto.

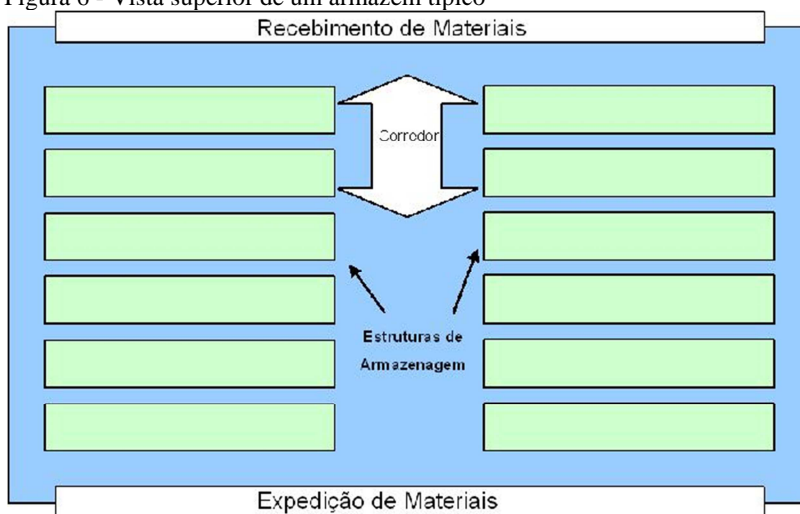
Em todo projeto de construção ou de equipagem de um armazém, é importante considerar aspectos de “tecnologia X capital” possível a ser investido. Também é válido afirmar, que um menor investimento em tecnologia, trará um maior custo de operação. Sendo que o inverso terá um maior custo com a depreciação dos equipamentos.

2.3.1 Funções dos Armazéns

Os armazéns possuem várias funções práticas e que servem de subsídio para sua existência. A principal função, que se pode destacar é a guarda física do produto, levando a geração de estoque (BALLOU, 1993).

A necessidade de balancear a demanda e a oferta de produtos obriga as empresas a realizarem a guarda física dos mesmos. Para tanto, a armazenagem deve oferecer alguns serviços associados, que vão desde a proteção física, manutenção de registros de informação, acondicionamento, rotação de estoques, etc. A figura 6 demonstra uma vista superior de um típico armazém (BALLOU, 1993; BOWERSOX & CLOSS, 2001).

Figura 6 - Vista superior de um armazém típico



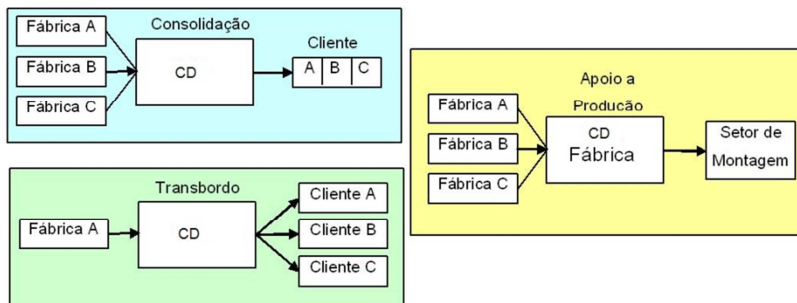
Fonte: Bowersox & Closs (2001)

A armazenagem em sua função de guarda do produto também serve para estocar produtos sazonais e ou envelhecer bebidas, como por exemplo: o amadurecimento de banana; envelhecimento de uísque (RODRIGUES; 2007).

No caso de produtos alimentícios, esta função de guarda deve vir aliada à eficiência de movimentação, pois estes estoques são de giro muito rápido, e entrando e saindo dos armazéns com maior velocidade que produtos de bens de consumo (RODRIGUES; 2007; POHL *et al.*, 2009).

Outras funções bem conhecidas podem ser analisadas na figura 7, que são atividades de consolidação, transferência ou transbordo e apoio à produção (BALLOU; 1993; ÖNÜT *et al.*, 2008).

Figura 7 Atividades de Consolidação, Transbordo e Apoio a Produção em Armazéns.



Fonte: Ballou (1993)

A consolidação une cargas de mais de um fabricante e as envia a um único cliente. Ela proporciona uma economia de transporte, uma vez que os fabricantes podem enviar cargas fechadas de seus itens individuais, e o Centro de Distribuição (CD), que acaba tendo um compartilhamento do frete para o mesmo cliente, com vários produtos diferentes (BALLOU, 1993; BOWERSOX & CLOSS, 2007; GERALDES *et al.*, 2011).

O transbordo é o inverso. Um único fabricante envia cargas fechadas ao CD que realiza o *picking* (separação) e os envia a mais de 1 cliente em cargas de menor volume. Em situações como essa, os CD's utilizam o mesmo transporte para enviar mercadorias de mais de um fabricante (BALLOU, 1993; BOWERSOX *et. al.*, 2007).

A função de apoio à produção é aquela armazenagem de componentes e peças fabricadas em diversos fornecedores e enviadas a um único local para que seja realizada a montagem da peça final (BANZATO *et al.*, 2003).

O Cross-Dock é similar ao transbordo, sendo que o CD também envia carga consolidada a vários clientes diferentes. A diferença é que realiza a recepção de produtos de vários fabricantes. Neste caso, existe uma intensividade alta na separação, movimentação, recepção e expedição de materiais no depósito (BALLOU, 1993; BOWERSOX & CLOSS, 2001).

O processamento e ou adiantamento de produtos também é uma função que pode ser realizada pelo armazém. Neste caso, os produtos acabam sendo terminados apenas nos centros de distribuição avançados. Por exemplo: - a montagem de kits de venda, onde são agrupados 2 ou 3

itens em apenas um produto; o processamento das garrafas descartáveis de refrigerantes. As mesmas são produzidas em um formato menor, sendo apenas re-processadas ao formato final no CD do fabricante. Esta atividade tem o objetivo de reduzir o custo com transporte das embalagens vazias (BALLOU, 1993; BOWERSOX *et. al.*, 2007).

É importante avaliar, que a estrutura de serviços oferecida por um armazém pode ser muito ampla. Principalmente em situações onde são exigidas mão de obra intensiva para processamento da atividade. Assim sendo, cria-se uma oportunidade para o CD transformar suas atividades de apenas armazenagem para a prestação de serviços, agregando valor ao serviço prestado (RODRIGUES, 2007; CHAN & CHAN, 2011).

Existem empresas que se especializaram em prestar serviços nesta área de armazenagem, onde grandes ganhos com produtividade das operações podem ser observados.

Em operações assim, a fábrica envia sua produção ao centro de distribuição contratado que irá armazenar e manter os produtos em estoque até a chegada de um pedido do cliente do fabricante. Nesta atividade, outras funções também poderão ser desempenhadas pelo CD, sendo (BALLOU, 1993; BOWERSOX & CLOSS, 2001; ASHAYERI & GELDERS, 1985):

- Controle do Estoque;
- Informações do Estoque;
- Emissão de Notas Fiscais;
- Distribuição;
- Separação e Movimentação de Materiais;
- Emissão de notas fiscais; e outros.

2.3.2 Tipos de Depósitos

As empresas que necessitam de espaço físico para armazenagem, contam com algumas opções de tipos de depósitos para realizarem sua escolha. Estas opções são (BALLOU, 1993; BOWERSOX & CLOSS, 2001): Espaço físico próprio; Aluguel de espaço de terceiros; Aluguel de Instalações; e Estocar em trânsito.

A maior parte das indústrias e organizações de serviços possui o próprio espaço físico para armazenar seus produtos. Esta decisão ocorre, pois a compra do próprio espaço permite que a empresa possa decidir o que fazer no espaço tendo também um maior controle sobre as operações. Pode por exemplo, converter o espaço para outros usos como

parte da fábrica, base para escritórios de venda e administrativo (BANZATO; *et al.* 2003; DESHPANDE *et al.*, 2007).

Entretanto, para que a empresa possa ter o próprio depósito, é necessário investimentos. Estes requerem um retorno de capital para os acionistas, fazendo com que a rentabilidade, em algumas situações, não seja alcançada. Portanto, o fator financeiro é que decidirá pela compra ou não do espaço próprio (RODRIGUES, 2007; BANZATO; *et al.* 2003).

Em algumas situações, o produto requer pessoal ou equipamentos especializados, como por exemplo, a indústria química, siderúrgica e farmacêutica, o armazém próprio pode ser a única saída.

Já o aluguel de espaço de terceiros são espaços alugados em armazéns denominados públicos, que oferecem serviços de armazenagem, distribuição e controle de estoques. Aqui o armazém é administrado por uma empresa prestadora de serviços que loca o espaço para outros clientes (RODRIGUES, 2007; FABER *et al.*, 2002).

A opção por um espaço de terceiros pode ser baseada em algumas condições básicas: necessidade de variedades de serviços; armazenagem por pouco período de tempo; grande sazonalidade no estoque; foco em outras atividades; e compartilhamento de custos (BALLOU; 1993).

A grande vantagem deste sistema é transformar os custos fixos em variáveis, o que torna atraente este tipo de operação em situações de grandes flutuações no estoque ou pouco volume de estocagem (LIMA, 2006).

Existem diversas especialidades de armazéns para cada tipo de produto, como por exemplo: Armazéns de Commodities (silos de grãos); Armazéns para grãos (petróleo, produtos químicos líquidos); Armazéns refrigerados (laticínios; carnes; vegetais; comida congelada); Armazéns para utilidades domésticas e móveis (eletrônicos; mobiliário; televisores); Armazéns de mercadorias em geral (peças, madeira) (BALLOU, 1993).

O aluguel de instalações é uma opção muito similar ao espaço próprio. A única diferença é que o local físico é alugado, normalmente com contratos por exercício e que variam de 1 a 10 anos. Neste caso, o aluguel deixa a empresa com uma maior flexibilidade em necessidades de mudança do local de armazenagem. Pode-se considerar uma melhor forma de rentabilidade para o negócio, visto que não é necessário investimentos em ativos (BALLOU, 1993).

A armazenagem em trânsito consiste na utilização da armazenagem em seus meios de transporte durante o tempo de deslocamento. Certos produtos, como frutas, necessitam de tempo para

maturação. Neste caso, é interessante utilizar um modal que leve o tempo necessário para maturar o produto. Sendo assim, não seria necessário contratar armazém para esperar o tempo correto para distribuição do produto (BOWERSOX & CLOSS, 2001; SYKES & WYCOMBE, 1994).

2.4 DESAFIOS DA ARMAZENAGEM MODERNA

A armazenagem possui diversas funções e atividades. Depende de grau de terceirização e da complexidade do produto para escolher serviços contratados ou próprios. Em muitas ocasiões, os fabricantes acabam optando pela terceirização, para poder focalizar esforços e ações nas operações de vendas e de produção (RODRIGUES, 2007; ROODBERGEN & VIS, 2006).

Diante desta oportunidade, diversos prestadores de serviço estão disponíveis nos dias de hoje, bem como a variedade de serviços prestados por eles (BANZATO *et al.*, 2003).

O cliente tem sido cada vez mais exigente com relação à qualidade, novidade e exclusividade de produtos. Isto tem obrigado as empresas a aumentarem a quantidade de produtos disponíveis no mercado e, por conseguinte reduzir suas quantidades individuais. Assim sendo, o número total de itens armazenados não diminuiu, mas sua variedade aumentou (BALLOU, 1993; PAN & WU, 2012).

Neste novo cenário, a armazenagem terá grandes desafios pela frente. Com o aumento da variedade de produtos, o número de movimentação e de separação dentro dos armazéns vem aumentando substancialmente. Assim sendo, a produtividade do armazém será fundamental para a contenção de custos. Custos estes relacionados à ocupação do espaço e a otimização dos equipamentos e mão de obra (SYKES & WYCOMBE, 1994).

Estruturas de armazenagem que não possuem seletividade em localizar e retirar o item do estoque se tornarão proibitivas neste novo padrão de consumo, visto que quanto maior a dificuldade em retirar o produto armazenado, maior o custo envolvido na movimentação. Assim sendo, a ocupação volumétrica do espaço tende a ser reduzida, e, por consequência os custos de armazenagem aumentam proporcionalmente (RODRIGUES, 2007).

A utilização intensiva de automação e tecnologia da informação será pré-requisito e não apenas um modismo. Novas técnicas de layout e arranjo físico serão de fundamental importância para a redução de tempos e movimentos em um armazém (PETERSEN *et al.*, 2005).

Os métodos atuais de gestão não serão suficientes para esta nova realidade. Técnicas matemáticas, estatística, pesquisa operacional e simulação de eventos serão fundamentais para testes de novos modelos de operações de armazéns. O investimento em novos métodos de trabalho e tecnologias de apoio deverá ocorrer com maior frequência e assertividade (DONATH *et al.*, 2002).

Assim sendo, será necessária menor quantidade de mão de obra, mas com maior qualificação, treinamento e aptidões diversas.

2.5 SISTEMAS DE ARMAZENAGEM

As instalações de armazenagem possuem a finalidade de receber, armazenar e proteger mercadorias soltas ou embaladas, de diferentes tipos e características, oferecendo segurança de manuseio às pessoas e equipamentos de movimentação (RODRIGUES, 2007).

Nas instalações de armazenagem, a utilização de sistemas e estruturas de armazenagem visa a maior utilização do espaço volumétrico. Para tanto, estes sistemas devem possuir alto grau de ocupação e ainda assim manter a seletividade sobre o material (BALLOU, 1993; BOWERSOX & CLOSS, 2001; BANZATO *et al.*, 2003).

Ao buscar instalações para armazenagem, o primeiro aspecto a ser levado em conta é a natureza predominante das mercadorias a serem armazenadas, pois para cada tipo existirá um tipo de armazenagem adequado, que são (RODRIGUES, 2007; BANZATO *et al.*, 2003; CHOPRA & MEINDL, 2004):

- Almoxarifados: são denominadas as estruturas que estão ligadas à movimentação interna de uma empresa, e que servem para armazenar durante o processo de transformação. Estes almoxarifados podem ser de matérias-primas, produtos em processo, peças de reposição, produtos acabados e de ferramentas.
- Depósitos: São estruturas próprias, contratadas e ou terceirizadas que servem apenas para a guarda e estocagem dos itens, sendo que não existe estrutura fabril próxima.
- Centros de Distribuição: áreas de armazenagem com alta tecnologia nos sistemas de armazenagem e de tecnologia da informação. São estruturas destinadas para operações de alta rotatividade, onde se recebe grandes lotes homogêneos, que

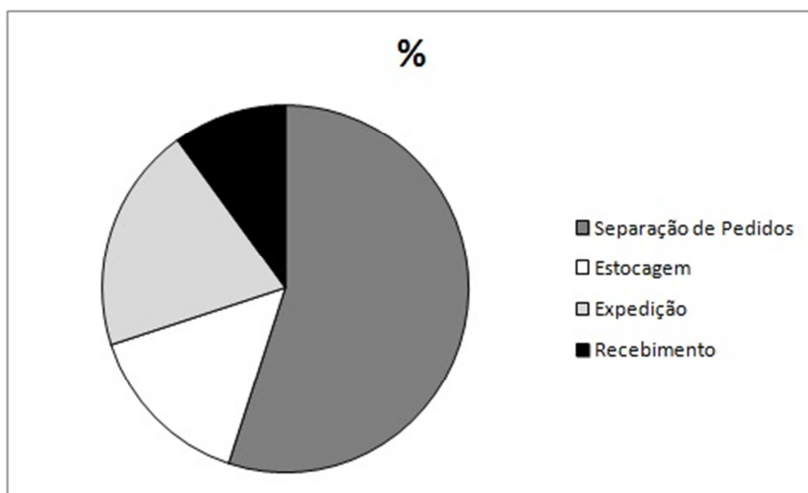
são desmontados e separados para montar os pedidos dos clientes.

- Armazéns: São estruturas de madeira, metal e ou alvenaria com portas e espaços para movimentação e entrada/saída dos materiais. Podem ser classificados em: armazéns de pequenos volumes e embalagens frágeis; grandes e pesados volumes; mercadorias passíveis de condensação: por exemplo, a madeira verde necessita de ventilação e aquecimento para realizar sua secagem; mercadorias congeladas e ou resfriadas; mercadorias suscetíveis a deterioração do calor e do frio.
- Galpão: construção rudimentar coberta que geralmente serve de pulmão para os armazéns.
- Pátio: área de armazenagem descoberta com zona de empilhamento e via de acesso demarcado.
- Silo: construção de metal, aço ou concreto disposta na posição vertical que armazena cereais, fertilizantes e rações animais, sendo dotadas de esteiras de transporte.
- Tanque: são sistemas de aço que armazenam combustíveis e grãos líquidos. São estruturas com sistemas de máxima segurança para aquecimento e resfriamento,
- Módulos Estruturados: São estruturas modulares feitas de PVC ou de tecido poliéster que podem ser montadas para suprir um excesso temporário de demanda, onde é necessário o aumento da armazenagem.

Assim, considerando o local de armazenagem dos produtos, independente do tipo de armazenagem, os custos operacionais de um armazém podem ser classificados em recebimento, estocagem, separação de pedidos e expedição. A figura 8 demonstra uma média em percentual dos custos relativos à armazenagem (RODRIGUES, 2007; BANZATO *et al.*, 2003; LIMA, 2006; POWER *et al.*, 2007).

É importante observar que 55% do custo total são relativos ao momento de separar o pedido solicitado, sendo a estocagem apenas 15%. Entretanto, a correta escolha do sistema de armazenagem pode influenciar diretamente estes custos envolvidos, uma vez que quanto maior a dificuldade em separar os pedidos, maior o custo com esta atividade.

Figura 8 Relação entre os custos da armazenagem



Fonte: Lima (2006)

2.5.1 Estruturas do tipo Porta Paletes

As estruturas do tipo porta paletes permitem a verticalização do espaço de forma simples e seletiva, possibilitando o acesso rápido a toda carga armazenada através do uso de empilhadeiras. Além da armazenagem paletizada propicia outras utilizações como áreas de *picking*, cargas containerizadas, passarelas em piso entre os planos, armazenagem de tambores, bobinas e outros materiais (BALLOU, 1993; HUQ *et al.*, 2006).

Esta estrutura possui alta seletividade, sendo que necessita de um espaço maior para corredores e a movimentação das empilhadeiras, perdendo assim relativa capacidade de ocupação volumétrica. Na figura 9 pode-se observar a vista frontal desta estrutura, onde apenas dois paletes são colocados por posição, ficando o acesso da empilhadeira pelos dois lados da estrutura (MECALUX, 2011).

Nesta situação, o operador pode ter acesso a qualquer mercadoria armazenada dentro das instalações, uma vez que não existe sobreposição na armazenagem.

Pode-se observar também, que estas estruturas necessitam de corredores, para que os equipamentos de movimentação possam alcançar lugares altos de armazenagem. Quanto mais alto for a estrutura,

maior o lastro de contrapeso do equipamento de movimentação, aumentando assim a necessidade de espaços maiores para estes corredores (STILL, 2008).

Figura 9 Estruturas do tipo porta paletes.



Fonte: Mecalux (2011)

O foco do presente trabalho são as estruturas porta-paletes, estando detalhadas neste subtítulo. Outras estruturas estão detalhadas no Apêndice B.

2.5.2 Ocupação X Seletividade: A melhor escolha do sistema

Os sistemas de armazenagem são concebidos para melhorar a ocupação e a seletividade para cada tipo de produto e negócio das empresas.

A tabela 1 demonstra um comparativo entre os vários sistemas de armazenagem e suas vantagens e desvantagens (RODRIGUES, 2007; BANZATO *et al.*, 2003, MECALUX, 2011; ÁGUIA, 2010; GU *et al.*, 2010).

Para cada tipo de sistema, uma vantagem é mais apropriada para certos tipos de estocagem. Por exemplo, para armazenar uma grande quantidade de paletes de caixas de leite da mesma marca que irão ser expedidos em 4 ou 5 dias, a melhor saída é a utilização das estruturas do tipo *Drive*. Elas proporcionam uma melhor ocupação volumétrica e neste caso não necessitam de seletividade, uma vez que todos os produtos chegarão e sairão no mesmo momento.

Tabela 1 Vantagens e Desvantagens dos sistemas de armazenagem.

Método	Vantagem	Desvantagem
Estruturas Blocadas	<ul style="list-style-type: none"> • Equipamento Simples; • Baixo Custo; • Aproveita o volume. 	<ul style="list-style-type: none"> • Propicia avarias; • Dificulta o controle • Desperdiça o volume com cargas heterogêneas.
Porta Paletes	<ul style="list-style-type: none"> • Equipamento Simples; • Baixo Custo; • Seletividade. 	<ul style="list-style-type: none"> • Desperdiça espaço; • Necessidade de um excelente sistema de localização.
Porta Paletes Corredores Estreitos	<ul style="list-style-type: none"> • Aproveitamento do Volume; • Acesso individual aos paletes 	<ul style="list-style-type: none"> • Empilhadeira especial; • Alto custo; • Trilhos para equipamentos.
Porta Paletes estruturas deslizantes	<ul style="list-style-type: none"> • Aproveitamento do Volume; • Acesso individual aos paletes 	<ul style="list-style-type: none"> • Alto custo; • Trilhos para equipamentos.
Estruturas <i>Push Back</i>	<ul style="list-style-type: none"> • Aproveitamento do volume. 	<ul style="list-style-type: none"> • Alto custo; • Utilização para produtos sem prazo de validade.
<i>Drive In</i>	<ul style="list-style-type: none"> • Aproveita o espaço; • Acesso por dois lados; • Vigas de apoio diferentes. 	<ul style="list-style-type: none"> • Empilhadeiras especiais; • Piso bem dimensionado; • Requer sistema FIFO.
Armazenagem Dinâmica	<ul style="list-style-type: none"> • Equipamento simples; • Reduz movimentações; • Aproveitamento do espaço. 	<ul style="list-style-type: none"> • Alto Custo; • Projeto e paletes especiais; • Requer sistema FIFO.

Fonte: Adaptado de Rodrigues (2007); Banzato *et al.* (2003), Mecalux (2011); Águia (2010); Gu *et al.* (2010)

A tabela 2 apresenta um quadro comparativo entre os tipos de estrutura e suas características quanto aos equipamentos envolvidos e sua capacidade volumétrica X a seletividade (RODRIGUES, 2007; BANZATO *et al.*, 2003, MECALUX, 2011; ÁGUIA, 2010; HOU *et al.*, 2010; GU *et al.*, 2010).

Tabela 2 Comparativo entre sistemas de Armazenagem

Caracter. Sistema	Equipamentos Movimentação Armazenagem	Velocidade Operação	Seletividade	Densidade	Custos de Aquisição
Porta Paletes Convencional e Cantilever	Empilhadeira elétrica e GLP	Alta	Alta	Baixa	Baixo
Porta Paletes corredores estreitos	Empilhadeira trilateral	Média	Alta	Média	Médio
Porta Paletes grandes alturas	Transelevador	Alta	Alta	Alta	Alto
Porta Paletes deslizantes	Empilhadeira elétrica e GLP	Baixa	Média	Alta	Alto
Porta Paletes dupla profundidade	Empilhadeira pantográfica	Baixa	Média	Alta	Médio
Drive-in / Drive trough	Empilhadeira elétrica e GLP (com restrições)	Baixa	Baixa	Alta	Baixo
Push Back	Empilhadeira elétrica e GLP	Média	Média	Alta	Médio
Dinâmico	Empilhadeira elétrica e GLP e Transelevador	Alta	Alta	Alta	Alto
Blocagem /Container	Empilhadeira GLP	Baixa	Baixa	Alta	Médio

Fonte: adaptado de: Rodrigues (2007); Banzato *et al.* (2003), Mecalux (2011); Águia (2010); Hou *et al.* (2010); Gu *et al.* (2010)

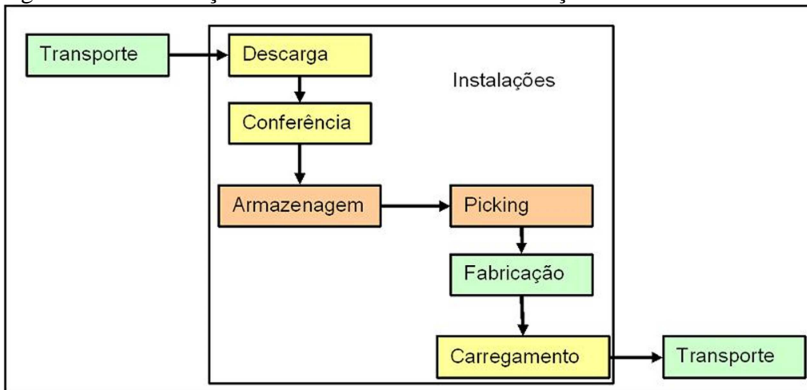
2.6 EQUIPAMENTOS DE MOVIMENTAÇÃO

As instalações fabris, de armazenagem ou de consolidação/distribuição têm suas atividades relacionadas à movimentação de materiais. Esta movimentação ocorre desde o momento da descarga do meio de transporte, na movimentação interna e no carregamento para expedição (BOWERSOX & CLOSS, 2001).

A movimentação interna é a que consome maior quantidade de recursos físicos e de mão de obra, onde atividades de conferência, armazenagem, *picking* e fabricação necessitam de meios para transportar e movimentar os insumos e ou produtos (Figura 10) (RODRIGUES, 2007; MALMBORG *et al.*, 1986).

Como dito anteriormente, 85% em média do custo de operação de uma instalação de armazenagem diz respeito a tarefas relacionadas à movimentação de materiais. Para tanto, é de fundamental importância que sejam utilizados conceitos e técnicas para viabilizar a movimentação ordenada nas instalações.

Figura 7 Movimentação de materiais dentro das instalações



Fonte: Rodrigues (2007)

Essas técnicas de movimentação de materiais utilizam o conceito de que movimentação de materiais não agrega valor ao produto do cliente, portanto como princípio básico deve-se buscar incessantemente a eliminação da movimentação (BANZATO *et al.*, 2003; RODRIGUES, 2007; DESHPANDE *et al.*, 2007).

2.6.1 Leis da Movimentação de Materiais

Em operações de movimentação, o principal fator delimitador na redução da movimentação é o leiaute e arranjo físico das instalações. Para tanto, algumas leis da movimentação devem ser utilizadas, que são (BALLOU, 1993; BANZATO *et al.*, 2003; RODRIGUES, 2007; CHIEN, 2004):

- Obediência ao fluxo das operações: Organizar o fluxo de movimentação de materiais no mesmo sentido do fluxo de produção;
- Mínima distância: Eliminar movimentações cruzadas e ou “zigzague”, reduzindo assim as distâncias das movimentações;
- Mínima manipulação: aumentar a participação da movimentação mecânica, se possível eliminando a movimentação manual. Reduzir e ou evitar a movimentação de produtos em processo;

- Segurança e satisfação: verificar a segurança dos operadores e do pessoal de circulação na escolha do equipamento de movimentação;
- Padronização: Utilizar equipamentos de movimentação padronizados e ou mais comuns no mercado. Isto reduz os custos de investimentos e de manutenção. Equipamentos especiais para movimentação possuem menos flexibilidade que os fabricados em série;
- Flexibilidade: Quanto mais flexíveis os equipamentos, maior o valor do mesmo para o usuário. Combinar flexibilidade com produção em série é uma boa saída;
- Máxima utilização do equipamento: Somente avaliar a compra de um segundo ou terceiro equipamento de movimentação, após a constatação de que a produtividade do atual seja superior a 60%.
- Utilização da gravidade: Desenvolver projetos de esteiras que utilizem a combinação de sistemas motorizados e gravidade, como por exemplo, elevar a carga por motorização em um pequeno trecho para que depois sejam transportados por longos trechos através da gravidade.
- Máxima utilização do espaço disponível: verificar a possibilidade de verticalizar o espaço de armazenagem, ocupando melhor o espaço volumétrico;
- Método alternativo: desenvolver um método alternativo para movimentar os materiais em caso de falha do equipamento mecânico. Esta alternativa, apesar de menos eficiente, pode suprir uma necessidade momentânea;
- Custo em uso: Selecionar equipamentos na base do custo total da operação, e não somente no valor desembolsado inicial. Equipamentos com baixo valor de investimento podem ter maior consumo de combustível, maior custo de manutenção e menor produtividade.

Outras considerações a serem realizadas na movimentação é evitar situações onde a mão de obra manipule mercadorias com peso superior a 25 kg, incluindo elevação de carga sem ajuda mecânica (RODRIGUES, 2007; FABER *et al.*, 2002).

No fluxo de materiais, deve-se evitar o desvio da movimentação lógica dos produtos para atividades como inspeção, conferência, liberação e outros. O processo natural de transformação é que deve ser

seguido como fluxo, sendo movimentações adicionais desnecessárias e não agregam valor ao cliente (RODRIGUES, 2007; BANCATO *et al*, 2003).

Por sua vez, não devem ocorrer paradas na linha de produção devido à falta de insumos/matéria-prima, e ou paradas devido à utilização da mão de obra de operação para movimentação destes (BALLOU, 1993).

Ao desenvolver uma adequada movimentação de materiais, alguns benefícios são obtidos, como por exemplo, redução de custos de mão de obra, materiais e equipamentos, pois a quantidade de movimentação de materiais será reduzida proporcionalmente; maior capacidade produtiva dos sistemas de armazenagem e da disponibilidade de materiais para a linha de fabricação; e melhores condições de trabalho para os operadores e envolvidos no processo, reduzindo fadiga e exposição aos riscos (RODRIGUES, 2007; ROODBERGEN & VIS, 2006).

2.6.2 Equipamentos de Movimentação

Os equipamentos de movimentação podem ser classificados em manuais, motorizados e inteligentes. Os equipamentos motorizados inteligentes são equipamentos motorizados que podem ser avaliados quanto ao grau de automação. Em situações de grande automação, observa-se inclusive a integração com os softwares de gerenciamento das empresas (BALLOU, 1993).

O equipamento mais usual na movimentação de materiais é a paleteira. A paleteira possui a capacidade de movimentar cargas unitizadas em paletes. Elas são divididas em manuais e ou motorizadas, sendo que esta última, em geral, são movidas a eletricidade através de baterias recarregáveis (Figura 11) (RODRIGUES, 2007).

Estes equipamentos possuem a característica de movimentação de pequenas distâncias, sendo utilizadas em locais para pequenas movimentações (STILL, 2008).

Por sua vez, as paleteiras elétricas também possuem a possibilidade de elevar a carga em níveis limitados, neste caso, elas são comumente chamadas de *Stacker*.

Figura 8 Paleteira elétrica e manual



Fonte: Still (2008)

Já as empilhadeiras convencionais são equipamentos mecanizados que possuem a capacidade de movimentação para maiores distâncias e podem armazenar cargas em níveis maiores de altura. A motorização pode ser por motor a combustão e ou elétrico. As empilhadeiras elétricas são mais caras devido ao sistema de baterias, entretanto, em ambientes fechados, é a única solução devido a empilhadeira de combustão produzir gases de descarga (Figura 12) (STILL, 2008).

Figura 9 Empilhadeira a combustão e elétrica



Fonte: Still (2008)

Outros sistemas de empilhadeiras elétricas que são utilizadas no mercado e possuem maior elevação de altura com relação às empilhadeiras convencionais são: empilhadeira retrátil, empilhadeira bilateral e empilhadeira trilateral.

As empilhadeiras Bilateral e Trilateral são muito semelhantes, diferindo que a empilhadeira trilateral além de mover o garfo de coleta

do paleta para frente e para um dos lados (como a empilhadeira bilateral), também move para o outro lado. Este recurso faz com que o equipamento não precise manobrar para retirar/ acondicionar o paleta na estrutura (STILL, 2008).

Já a empilhadeira retrátil não possui esta capacidade de movimentação do garfo, mas atende grandes alturas. A figura 13 apresenta o modelo das empilhadeiras de grande capacidade de altura.

Figura 10 Empilhadeiras Bilateral, Trilateral e Retrátil



Fonte: Still (2008)

O Apêndice C apresentam outros equipamentos de movimentação e que não estão relacionados ao estudo do trabalho.

2.6.3 Seleção de Equipamentos

A seleção de equipamentos deve ser realizada por um profissional que conheça todo o processo da empresa. Os equipamentos a serem adquiridos devem seguir o fluxo correto do processo da empresa. Assim sendo, não convém analisar solicitações isoladas de equipamento de movimentação, pois neste caso, corre-se o risco de uma subutilização do mesmo devido ao seu exclusivo uso por uma determinada área e ou departamento (RODRIGUES, 2007).

O tipo de carga a ser movimentada é de fundamental importância para a escolha do equipamento. Cargas que são possíveis de paletização podem ser movimentadas por empilhadeiras e por paleteiras.

Normalmente estes meios de movimentação possuem um limite de aproximadamente 1 a 1,2 tons para cada unidade, sendo necessário um equipamento mais robusto para a utilização de cargas com maior peso. Existem equipamentos que movimentam mais de 10 toneladas, entretanto, necessitam de espaço maior para movimentação (RODRIGUES, 2007; BANZATO *et al*, 2003).

Outro detalhe a ser considerado é o local de uso e a necessidade ou não de verticalização da carga. Se o equipamento for utilizado em locais fechados e em ambientes compartilhados com operadores, é fundamental a utilização de equipamentos elétricos que são mais silenciosos e não emitem gases nocivos ao ser humano. A decisão sobre a verticalização também é importante, pois a torre para elevar cargas encarece o equipamento, e ao comprar sem esta opção, ao mudar sua necessidade para elevar cargas, será necessário adquirir outro equipamento (RODRIGUES, 2007; BANZATO *et al*, 2003).

A tabela 3 demonstra as principais características de cada equipamento e as principais aplicações dos mesmos. Pode-se observar que fatores como continuidade de fluxo dos materiais e distâncias podem resultar na escolha de um equipamento diferente.

Para operações onde as atividades são aleatórias, o mais indicado são equipamentos guiados por um operador, onde o trajeto a ser realizado é feito pelo próprio. Isto aumenta a flexibilidade de operação do equipamento, mas também necessita de maior envolvimento da mão de obra.

Ao realizar um roteiro para escolha do equipamento ideal, onde alguns fatores mencionados neste capítulo devem ser levados em consideração, a probabilidade de acerto na escolha do equipamento aumenta.

Ao escolher o modelo do equipamento de movimentação, deve-se passar a uma segunda etapa, que é a escolha do tipo do equipamento propriamente dito. Por exemplo: em uma operação de carga e descarga de contêineres onde é utilizada uma empilhadeira de paletes, deve-se levar em conta a necessidade e ou possibilidade da empilhadeira entrar no container. Para tanto, a mesma deve possuir uma torre telescópica de 3 estágios, onde quando o garfo está totalmente abaixado, consegue-se ter um equipamento portátil, mantendo ao mesmo tempo a capacidade de posicionar cargas a alturas superiores a 5 metros (RODRIGUES, 2007; BANZATO *et al*, 2003).

Tabela 3 Características dos equipamentos de movimentação

Características do Movimento		Equipamentos
Roteiro	Programação Repetitiva	Monovias
	Programação Aleatória	Empilhadeiras, Paleteiras
Frequência de Movimentação	Fluxo Contínuo de Materiais	Correias Transportadoras
	Fluxo Intermitente de Materiais	Tratores para movimentação
Distâncias Percorridas	Curtas e Frequentes	Empilhadeiras Paleteiras
	Longas e Sistemáticas	Comboios Tracionados
Ambiente Fabril	Interno	Empilhadeiras elétricas
	Externo	Tratores a combustão
Direção do Fluxo	Horizontal	Tratores, correias, correntes
	Vertical	Elevadores de Carga
Acionamento	Manual	Paleteiras
	Motorizado	Empilhadeiras

Fonte: Rodrigues (2007); Banzato *et. al* (2003); Still (2008); Scheffer (2011)

2.7 MOVIMENTAÇÃO E LOCALIZAÇÃO DE MATERIAIS

Os materiais ao ingressarem em um depósito e ou armazém, necessitam ser identificados para facilitar a movimentação, identificação e controle. Em estoques de grande volume e com grandes quantidades de itens, é fundamental seguir uma lógica de identificação e localização de materiais, com a finalidade de facilitar a compreensão dos colaboradores sobre a natureza dos materiais e seus locais de guarda (MOURA, 2004; PETERSEN II, 1997).

Estes sistemas de identificação de materiais e a localização destes auxiliam na melhoria dos sistemas de separação de materiais (*picking*), tornando o armazém mais produtivo. Para maiores informações dos métodos de classificação e localização de materiais, consultar o Apêndice D.

Através destas atribuições, pode-se definir uma política de separação de pedidos que irá permear o método de trabalho do armazém e sua consequente produtividade.

2.7.1 Sistemas de *Picking*

O *picking*, ou seleção de pedido de um cliente, refere-se ao processo de retirada do estoque dos produtos relacionados em um pedido. Este pedido pode ser de venda, no caso de um cliente solicitar uma determinada mercadoria, ou de ressurgimento, utilizado para atender a demanda interna da própria empresa. Analogamente, tem-se a coleta de itens no supermercado através de uma lista pelo consumidor (CHOPRA & MEINDL, 2004; BALLOU, 1993).

A estratégia de *picking* é a forma como é organizado o processo de separação de pedidos, planejando a quantidade de operadores por pedido, o número de diferentes produtos pegos em cada coleta e os períodos para agendamento ou agrupamento de pedidos durante um turno (RODRIGUES, 2007; BANZATO *et al*, 2003; DESHPANDE *et al.*, 2007).

Esta atividade é uma das mais importantes do armazém e chega a representar 55% dos custos. Esta também consome algo em torno de 50 a 60% do tempo para completar as atividades de um pedido em um armazém, que neste caso, é um dos pontos fundamentais no nível de serviço ao cliente (RODRIGUES, 2007; BANZATO *et al*, 2003).

Isto faz com que esta atividade de *picking* seja prioritária dentro do armazém, justificando aumento de esforços principalmente em sistemas e métodos de separação.

Dentro da área de estocagem faz-se necessário a separação de uma área para *picking*. O tamanho desta área será de acordo com o tamanho das unidades de separação, a quantidade de pedidos expedidos por dia, a variedade de itens e o tempo disponível para entrega da mercadoria (RODRIGUES, 2007; BANZATO *et al*, 2003; HAN & DAMRONGWONGSIRI, 2005).

O grau de giro das mercadorias determinará o nível de tempo de deslocamento do operador na área de estocagem, sendo que para minimizar este deslocamento, em alguns momentos é possível criar uma área de estocagem intermediária entre a área de estoque e o *picking* (RODRIGUES, 2007; BANZATO *et al*, 2003; CHOPRA & MEINDL, 2004).

As atividades de deslocamento dos operadores também são fundamentais para melhorar a produtividade do *picking*. Assim,

surgiram alguns métodos de organização de trabalho para deslocamento dos operadores (HOU *et al.*, 2010).

Os métodos mais comuns são os algoritmos: que auxiliam na definição de rota de coleta, desenvolvidos para minimizar a distância média percorrida durante a seleção de pedidos; e auxiliam nas lógicas de endereçamento, utilizadas para reduzir a distância média de movimentação; e para a organização do trabalho, com objetivo de maximizar a quantidade de pedidos selecionados em cada deslocamento (RODRIGUES, 2007; BANZATO *et al.*, 2003).

Quanto mais fracionados forem os pedidos, mais pedidos existem por dia, maior será a quantidade de itens a serem separados, menor será o tempo para a entrega dos produtos e, por consequência, mais complexa será a operação (BALLOU, 1993; HOU *et al.*, 2010).

Também quanto mais complexa a operação, menor será a produtividade do picking e maiores serão as chances de erros nos pedidos (BOWERSOX & CLOSS, 2007).

As estratégias de *picking*, para minimizar os tempos de movimentação, devem levar em consideração o número de operadores responsáveis pela separação de cada pedido, o número total de pedidos, a quantidade de produtos por pedido e o tempo necessário para a operação (BOWERSOX & CLOSS, 2007; BALLOU, 1993).

Existem vários métodos que auxiliam nestas estratégias, e contribuem para a redução do tempo total do pedido e os recursos envolvidos. Estes métodos podem ser (RODRIGUES, 2007; BANZATO *et al.*, 2003; CHOPRA & MEINDL, 2004; HUERTAS *et al.*, 2007):

- *Picking* discreto: cada pedido é feito por apenas um operador, sendo que apenas um produto é coletado por vez. Este apresenta um baixo índice de erro, pois é bastante simples. Por outro lado, apresenta uma baixa produtividade, decorrente do tempo excessivo gasto com o deslocamento do operador.
- *Picking* por zona: a área de armazenagem é dividida em zonas, cada zona armazena determinados produtos e cada operador é responsável por uma determinada zona. Neste processo cada operador separa os itens do pedido que estão armazenados sobre sua “responsabilidade” e os coloca numa área comum de consolidação, para que o pedido possa ser “montado” e completado. Isto significa que mais de um operador pode estar envolvido na separação dos produtos de um único pedido. A maior vantagem deste método é que

reduz o deslocamento dos operadores, cada um opera apenas numa zona. Sua maior dificuldade é balancear a carga de trabalho entre as zonas, pois existem diferenças nos giros dos produtos e no desempenho dos equipamentos.

- *Picking* por lote: os pedidos são acumulados, juntam-se as quantidades totais de cada produto e então o operador vai até a área de estocagem para coletar a soma dos pedidos. Esse método permite um aumento na produtividade do deslocamento do operador, desde que haja baixa variedade e baixo volume de itens em cada pedido. Por outro lado, aumentam as chances de erros na separação e ordenação dos pedidos devido à sua maior complexibilidade.
- *Picking* por onda: cada operador é responsável por um tipo de produto de cada vez, com diversas programações por turno. Desta forma, os pedidos são coletados em períodos específicos ao longo do dia. Como vantagem permite uma maior sincronia entre a operação de *picking* com a expedição, através de uma programação da hora de coleta e despacho de cada pedido. Também permite a possibilidade de combinação entre estas estratégias de picking, ou até mesmo a utilização de mais de uma delas simultaneamente.
- *Picking by light*: concilia o aumento de desempenho com a flexibilidade, pois os operadores não precisam se locomover para realizar a separação dos materiais. Este apresenta uma fila de itens armazenados em estruturas do tipo Flow Rack e os pedidos são separados conforme a iluminação acima dos itens é acesa. Este processo ainda utiliza um sistema de informação para calcular o peso do pedido total e assim realizar uma última checagem para garantir o correto atendimento do pedido.

A embalagem também tem papel fundamental no processo de seleção de pedidos, já que para atender melhor ao cliente, muitas vezes as embalagens são fracionadas em unidades menores conforme cada pedido (DONATH *et al.*, 2002; RODRIGUES, 2007).

As embalagens interferem positivamente à medida que protegem o produto e permitem ser fracionadas nas quantidades necessárias, sem que para isso suas caixas precisem ser abertas.

De qualquer maneira, independentemente da estratégia a ser adotada, a grande dificuldade após a escolha está na importância do balanceamento da linha, para que nenhum operador ou equipamento

fique sobre ou subutilizado (RORIGUES, 2007; SYKES & WYCOMBE, 1994).

Esta análise deve ser realizada periodicamente e sempre que necessário deverão ser feitas alterações para que o sistema permaneça balanceado. A busca constante pela maior produtividade, velocidade e precisão durante o *picking* fazem com que as empresas invistam em novas tecnologias. A simples implantação de tecnologia não garante melhorias operacionais, mas proporciona o desenvolvimento de novos processos (RODRIGUES, 2007; SYKES & WYCOMBE, 1994).

2.8 LEIAUTE NA ARMAZENAGEM

Quando se fala em um armazém, muitas são as variáveis que devem ser consideradas na concepção do mesmo. Dentre elas, pode-se citar: estrutura geral, dimensionamento e tamanho do armazém, leiaute, seleção de equipamentos e seleção da estratégia de operação. Entretanto, uma das variáveis que mais afeta a produtividade do armazém é a concepção do leiaute. Este pode incrementar ou diminuir questões como: custos de manutenção e de construção, custos de movimentação de materiais, capacidade de estocagem, ocupação do espaço físico e utilização dos equipamentos (GU *et al.*, 2010; VRYSAGOTIS & KONTIS, 2011).

O leiaute depende de muitos fatores que afetam o método de operação e dependem do tipo necessidade de armazenagem, bem como, a produtividade relativa do armazém. Assim sendo, antes de definir o leiaute de um armazém, as seguintes variáveis já devem estar definidas (STRACK & POCHET, 2010; MATIC *et al.*, 2012; HASSAN, 2002):

- Especificação do tipo e da utilização do armazém. Por exemplo: se o armazém é um centro de distribuição, um armazém de fábrica, um armazém de aluguel, entre outros;
- Previsão e análise da demanda esperada para o armazém. Incluindo itens de alta ou baixa demanda, *mix* de produtos, tempos de reposição de produtos, volume dos pedidos dos clientes, entre outros;
- Estabelecimento de políticas de operação; incluindo políticas de uso do armazém, políticas de *picking*, políticas de acondicionamento de itens, etc;
- Formação de classes entre os produtos. Esta irá auxiliar no acondicionamento e separação de itens, visto que os produtos estarão com uma política clara de separação;

- Seleção do tipo de estrutura de armazenagem: varia de acordo com a utilização dos produtos, onde se deve equalizar a ocupação do espaço bem como a seletividade dos produtos;
- Seleção do equipamento de movimentação: também varia de acordo com o tipo de produto bem como considerar a questão da ocupação e seletividade; e
- Capacidade nominal e dinâmica de armazenagem.

Uma vez definidas estas questões, deve-se projetar a concepção do leiaute de armazenagem. Para tanto, são necessárias as seguintes informações:

- Número de linhas de armazenagem;
- Quantidade de níveis de armazenagem;
- Dimensões das estruturas de armazenagem;
- Posicionamento das estruturas de armazenagem;
- Quantidade de corredores de passagem;
- Dimensões dos corredores de passagem;
- Posicionamento dos corredores de passagem;
- Pontos de entrada e saída do sistema de armazenagem.

Baseado nestas informações é possível projetar o armazém e seus custos operacionais de construção e manutenção. Entretanto, através do levantamento do referencial encontrado, pode-se observar que alguns itens são mais recorrentes na literatura quando abordados o tema relativo ao leiaute de armazéns, a saber:

- Design de Armazéns;
- Alocação de Itens em estruturas existentes;
- Alocação através de políticas de *picking*;
- Alocação de Itens em um armazém multi-níveis;
- Configuração dos corredores de acesso;
- Alocação de itens bloqueados;
- Movimentação de materiais.

Ao analisar as soluções propostas na literatura acadêmica pesquisada, pode-se verificar uma ampla gama de soluções apresentadas para armazéns. Esta diversidade encontrada deve-se ao fato de que existem muitas variáveis que incidem sobre as decisões de projeto na armazenagem. Estas decisões geram certos pré-requisitos que também

precisam ser definidos como explanado no início da seção 2.8. Pode-se observar nesta literatura acadêmica que os pesquisadores acabam focando a solução de seus modelos em um conjunto pequeno de variáveis. A tabela 4 apresenta a quantidade de pesquisas levantadas em relação as suas variáveis e que possuem relação com o tema da presente pesquisa.

Tabela 4 Pesquisas acadêmicas levantadas e relacionadas ao tema da tese

Variáveis de Decisão	Quantidade de Pesquisas Relacionadas
Alocação de itens em estruturas existentes	8
Alocação através de políticas de <i>picking</i>	25
Alocação de Itens em um armazém multi níveis	7
Configuração de estruturas de armazenagem e dos corredores de acesso	7
Alocação de itens bloqueados	5
Design e projeto de armazéns	6
Movimentação de materiais	8
Total	66

O Apêndice A demonstra a relação de autores e o foco da pesquisa com relação às variáveis de decisão nos projetos de armazenagem. Pode-se observar que existe uma grande quantidade de autores que enfatizam a melhoria da alocação e das políticas de *picking* como forma de melhorar a produtividade na armazenagem. Por outro lado, o quesito de dimensionamento das estruturas de armazenagem, bem como sua disposição e o projeto de design como forma de melhorar a produtividade pode ser visto em uma pequena parcela da literatura das pesquisas realizadas.

Já o Apêndice E demonstra quais são os modelos e ou soluções matemáticas utilizadas pelos autores. Neste ponto pode-se observar uma variação maior pela utilização de um modelo e ou solução, entretanto, existe uma ênfase na utilização de modelos heurísticos e meta-heurísticos. Isto pode ser constatado devido ao fato de que estes modelos

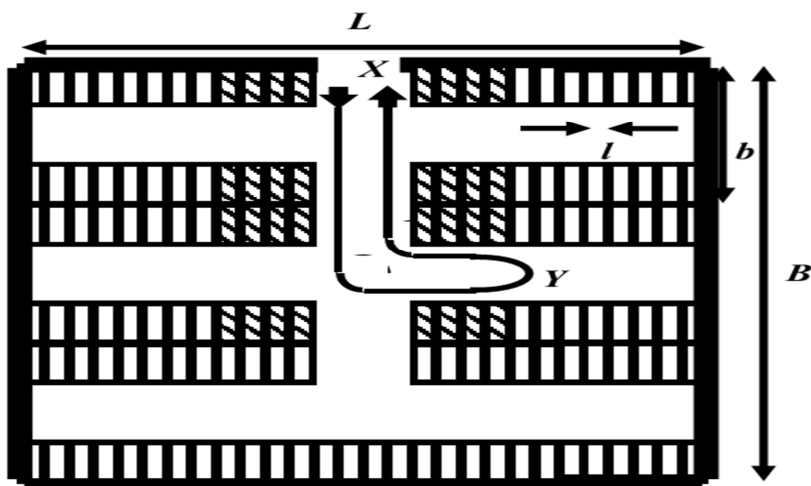
apresentam uma “relaxação” maior quanto ao cumprimento das restrições focando na otimização do problema. Pode-se afirmar que esta escolha também está relacionada à necessidade de um tempo rápido de resposta para as variáveis estudadas. Entretanto, quando se trata do design de um projeto de armazém que considera a produtividade, modelos matemáticos puros podem ser observados.

2.8.1 Design de Armazéns

Duas pesquisas em particular apresentam a preocupação com o leiaute e demonstram uma relação do tamanho do armazém com relação ao tamanho das estruturas de armazenagem. Estas pesquisas servem como base para outros modelos encontrados na literatura e que possuem como foco o leiaute do armazém.

Assim, antes de iniciar o projeto do armazém, uma decisão importante a se tomar com relação ao leiaute é a proporção entre a largura do armazém e a sua profundidade. Por questões de deslocamento, posicionamento de docas e tempo de deslocamento, De Koster (2010) afirma que um armazém deve ter uma proporção de 2 para a largura total do armazém (L) e 1 para profundidade total do armazém (B), ou seja, $L = 2B$, conforme figura 14.

Figura 11 Proporção entre dimensões no armazém



Fonte: De Koster (2010)

Além de respeitar esta proporção, De Koster (2010) afirma ainda que a proporção existente entre a largura de um conjunto de armazenagem (l) e as dimensões entre dois conjuntos separados pelo corredor de *picking* (b) afeta o dimensionamento das dimensões do armazém. Como demonstra a equação 1.

$$L = \sqrt{\frac{Plb}{n}} \quad e \quad B = \frac{1}{2} \times \sqrt{\frac{Plb}{n}} \quad (1)$$

Onde:

- P : número de posições paletes necessárias para armazenagem;
- n : Número de níveis do armazém.

Por sua vez, Novaes (1989) apresenta um modelo relacional com cortes em seções para apresentar estas variáveis do armazém, conforme figura 15.

Pode-se observar que o autor relata uma relação do terreno e da área de armazenagem, incluindo as áreas de carga e descarga. Para o modelo proposto, apenas as dimensões do prédio são consideradas e podem ser vistas através das equações 2 a 7.

No corte I da figura é possível validar que existem NN boxes na face norte, então, a largura do edifício será dada por:

$$B_1 \geq b_1 + NN \times a_2 + S \quad (2)$$

Onde:

- $B1$: Largura do edifício de armazenagem;
- $b1$: Largura do corredor principal de passagem;
- NN : Número de boxes de armazenagem;
- $a2$: Largura do Box de armazenagem;
- S : Largura da área administrativa.

Considerando os limites do terreno, tem-se que o corte II apresenta o limite para a largura do edifício:

$$B_1 \geq b_1 + 2 \times c + b_2 \quad (3)$$

Onde:

- c : largura do corredor de circulação interna.

$$A_1 \geq 2 \times b_2 + 2 \times C \quad (6)$$

$$A_1 \geq S + C + NL \times a_2 \quad (7)$$

Onde:

- A_1 : profundidade do edifício;
- M : número de posições de desembarque na plataforma A;
- NL : número de boxes ao longo da face leste do edifício.

O modelo proposto por Novaes (1989) apresenta uma boa relação de medidas entre o terreno e o edifício. Entretanto, o modelo do De Koster (2010), apresenta uma relação simples quando não se conhecem ainda as medidas do edifício. Por sua vez, os dois modelos não relacionam as distâncias percorridas através de um fluxo de trabalho, e sim, consideram apenas as dimensões do armazém.

Apesar das limitações propostas por estes dois modelos, os dois são utilizados como base inicial dos modelos de leiaute vistos na literatura pesquisada. Outros modelos podem ser encontrados em que a pesquisa relaciona-se com o leiaute do armazém, conforme pode ser visto do Apêndice A.

Outro modelo que se preocupa com o design de armazéns é o apresentado por Goetschalckx *et. al* (2002) que apontam a diferença de custos na utilização de estantes com gavetas e estantes com suporte para caixas de armazenagem. Este modelo apresenta a relação de custos da área, dos equipamentos e da operação.

Apesar da diferença nas estruturas dos equipamentos de armazenagem, o modelo apresentado é aplicado a ambos os casos, o que facilita a comparação de custos. A formulação apresentada por Goetschalckx *et. al* (2002) minimiza a soma dos custos da área, dos equipamentos e da operação de *picking* durante o horizonte de tempo planejado, a saber:

$$Min.z = CustoArea + CustoEquip + CustoOperação \quad (8)$$

Neste contexto, o dimensionamento das estruturas de armazenagem é realizado até que o total do volume das peças a armazenar for igual à capacidade disponível destas estantes. Inicialmente o modelo não computa o tamanho das peças e ou das prateleiras a serem armazenadas. Também é considerado problema inteiro para prover a capacidade adequada do armazém.

Para considerar os custos das estruturas de armazenagem a seguinte fórmula é utilizada:

$$CustoEquip = \sum_l DCusto_l \cdot NDU_l + \sum_m CCusto_m \cdot NCU_m \quad (9)$$

$$\sum_i MI_i \cdot V_i \leq \sum_l VUF \cdot DVC_l \cdot NDU_l \quad (10)$$

$$\sum_i MI_i \cdot W_i \leq \sum_l DWC_l \cdot NDU_l \quad (11)$$

$$\sum_l DVC_l \cdot NDU_l \leq \sum_m CVC_m \cdot NCU_m \quad (12)$$

$$\sum_l DWC_l \cdot NDU_l \leq \sum_m CWC_m \cdot NCU_m \quad (13)$$

Onde:

- *CCustom*: custo de uma estante do tipo m. Este custo é relativo a sua depreciação no período avaliado;
- *DCustol*: custo do compartimento l (gaveta, caixa, etc.) de armazenagem na estante;
- *NCUm*: variável de decisão referente ao número de estantes do tipo m utilizadas;
- *NDUl*: variável de decisão referente ao número de compartimentos de armazenagem utilizadas;
- *Mli*: inventário máximo da peça, expresso em unidades;
- *Vi*: volume de uma unidade da peça, expressa em metro cúbico por unidade;
- *Wi*: peso de uma unidade da peça, expressa em quilogramas;
- *DVCl*: capacidade volumétrica de um compartimento de armazenagem;
- *DWCl*: capacidade em peso de um compartimento de armazenagem;
- *CVCm*: capacidade volumétrica de uma estante de armazenagem;
- *CWCm*: capacidade em peso de uma estante de armazenagem;
- *VUF*: fator de utilização de volume, que é calculada através da razão entre o volume das peças a serem armazenadas pela capacidade volumétrica dos compartimentos de armazenagem.

Para calcular o custo da área, Goetschalckx *et. al* (2002), propõem utilizar o comprimento necessário dos corredores de *picking* através do número de estantes utilizadas pelo problema, assim, a área necessária é relativa ao número de ilhas necessárias, ou seja, para cada estante de armazenagem, soma-se seu espaço necessário de corredor.

$$\sum_m NCU_m \cdot CD_{mw} \leq 2 \cdot NA \cdot AL \quad (14)$$

$$AREA = [2 \cdot CAW + AL] \cdot [NA \cdot (2 \cdot CD_{md} + AW)] \quad (15)$$

$$CustoArea = AREA \cdot ACusto \quad (16)$$

Onde:

- $NCUm$: variável de decisão referente ao número de estantes do tipo m utilizadas;
- $CDmw$: largura da estante de armazenagem do tipo m ;
- NA : variável decisão relativa ao número de ilhas paralelas no projeto;
- AL : largura das ilhas de armazenagem;
- AW : comprimento das ilhas de armazenagem;
- $AREA$: área horizontal do projeto, que é assumida como constante durante o horizonte de planejamento;
- CAW : largura do corredor principal de passagem;
- $CDmd$: profundidade de uma estante de armazenagem;
- $ACusto$: Custo em unidade de área durante o período planejado. Este custo refere-se à depreciação no período.

Já para calcular o custo de operação, computa-se o número de funcionários baseados no tempo necessário de deslocamentos a serem realizados por estes, para realizar o *picking* dos pedidos. Para validar este custo, os autores assumiram que as ilhas de armazenagem somente possuem uma direção de deslocamento e os itens são alocados aleatoriamente nos compartimentos de armazenagem. Assim, tem-se que:

$$OTT = \frac{1}{WS} \cdot \left[\begin{aligned} & NA \cdot AL \cdot (1 - (1 - 1/NA)^{NL}) + \\ & 2 \cdot AW \cdot \left(NA - \sum_{j=1}^{NA-1} (j/NA)^{NL} \right) + \\ & AL \cdot \left(1/2 + 1/2 \cdot \sum_{j=1}^{NA} (j/NA)^{NL} \cdot \binom{NA}{j} \cdot (-1)^{j-1} \cdot 2^{(NA-j)} \right) \end{aligned} \right] \quad (17)$$

$$NE \geq NO \cdot (OTT + ET \cdot NL) \quad (18)$$

$$CustoOperação = ECusto \cdot NE \quad (19)$$

Onde:

- *OTT*: tempo de deslocamento esperado para o picking (CHEW, 1999 *apud* GOETSCHALCKX *et. al*, 2002);
- *WS*: velocidade de deslocamento do funcionário ao longo dos corredores, expressa em unidades de comprimento por tempo;
- *NA*: variável decisão relativa ao número de ilhas paralelas no projeto;
- *AL*: largura das ilhas de armazenagem;
- *NL*: número médio de itens por ordem;
- *j*: número de compartimentos de armazenagem;
- *NE*: número de funcionários utilizado;
- *NO*: número médio de pedidos por período de tempo;
- *ET*: tempo médio de retirada de um item do compartimento de armazenagem;
- *ECusto*: custo médio por funcionário durante o período de planejamento.

Para tornar válido o cálculo do custo de operação, faz-se necessário assumir uma taxa de produtividade por funcionário baseado em itens separados, chamado de taxa de *picking*, que pode ser calculada para um horizonte planejado, conforme segue:

$$EPR = \frac{NO \cdot NL}{NE} \quad (20)$$

Onde:

- *EPR*: taxa média de separação por funcionário durante o período planejado;

- *NO*: número médio de pedidos por período de tempo;
- *NL*: número médio de itens por ordem;
- *NE*: número de funcionários utilizado.

O modelo apresentado por Goetschalckx *et. al* (2002) identifica uma boa relação entre os custos da área, dos equipamentos de armazenagem e dos custos de operação. Os autores comparam dois modelos de armazenagem, sendo que cada um possui restrições diferentes de dimensões e custos e apresenta a melhor solução para o caso de peças de reposição.

Apesar das pesquisas apontadas, pouco se vê com relação ao dimensionamento dos armazéns e principalmente o design relacionado às estruturas de armazenagem.

2.8.2 Alocação de Itens em Estruturas Existentes;

Uma solução comum encontrada na literatura é o modelo inicial ou básico para problemas de leiaute, conhecido como “*Cube per Order Index*”(COI – Indexação pelo Volume dos Pedidos). Este modelo, apenas apresenta um método para alocar produtos dentro das estruturas previamente dispostas. Ele utiliza a razão da cubagem necessária para armazenar um item e sua popularidade (número de entradas e saídas dentro do armazém). Cria-se assim, uma lógica de armazenagem que aloca os produtos com a menor razão nos espaços mais próximos às docas de entrada e saída. Através desta lógica, formula uma lista ascendente e aloca os demais itens nas próximas vagas, e assim por diante (MALMBORG *et al.*, 1986).

Para formular este modelo, algumas premissas são necessárias. Tanto a separação de itens como a alocação dos mesmos dentro do estoque é realizada em momentos distintos, sempre com o equipamento de movimentação saindo e voltando ao ponto inicial de carga/descarga. Os endereços de armazenagem são assumidos como coordenadas em colunas “c” e linhas “l”, e o total de espaços para alocação formam um armazém retangular (MALMBORG *et al.*, 1986).

Malmberg *et. al.* (1986) afirmam que existem dois grandes fatores de custos associados com o leiaute que incluem os custos de inventário e os custos de picking. Inicialmente, definiu-se o custo do inventário por período de tempo através de parâmetros de custos previamente calculados. Estes custos estão associados ao cálculo do lote econômico de compras (LEC) sem considerar o estoque de segurança, a

saber, (MALMBORG *et al.*, 1986; KALLINA & LYNN, 1976; WILSON, 1977; HODGSON & LOWE, 1982):

$$\sum_j Ad_j n_j \left/ \left(\sum_c \sum_l X_{c,l,j} \right) + IC_j \left(\sum_c \sum_l X_{c,l,j} \right) \right/ 2 \quad (21)$$

Onde:

- A : Custo por ordem de reposição de pedidos;
- dj : Frequência media de ordens para o item j (transações / período);
- nj : Numero médio de produtos por pedido contendo o item j ;
- I : Taxa de manutenção dos estoques (%);
- $X_{c,l,j}$: Variável de decisão do produto j armazenado nas coordenadas $(c;l)$ sendo seu resultado 0 ou 1;
- Cj : Custo unitário do item j .

O produto djn_j representa a demanda por período de tempo e a somatória, $\sum \sum X_{c,l,j}$, o tamanho do lote do item j , ou em outras palavras, a quantidade total do item j estocado no armazém.

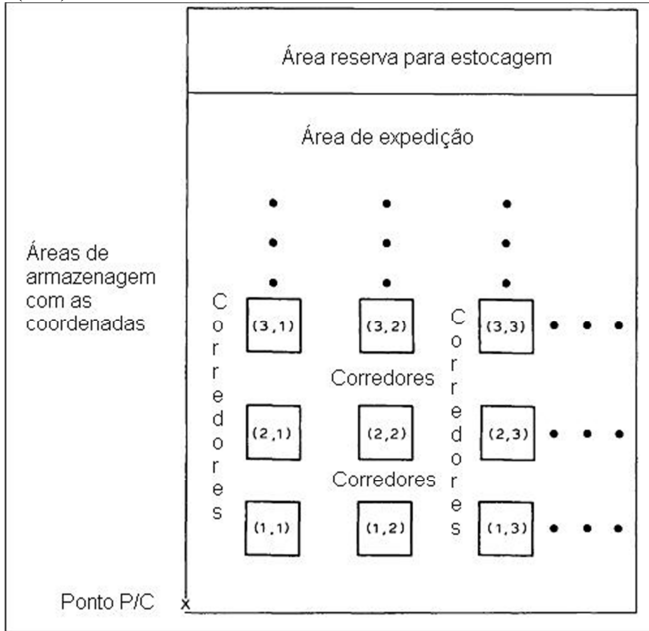
O custo para separar os itens em estoque (*picking*) pode ser expresso através do custo da movimentação do veículo de carga/descarga. O veículo que realiza o *picking* se desloca em um padrão retilíneo com a rede dos locais de armazenamento, representado na figura 16.

Assim, o custo desta movimentação de $(c;l)$ para $(c';l')$ é definida por:

$$w(|c-c'|+|l-l'|)L \quad (22)$$

Neste caso, w , é o custo por metro movimentado para separar um pedido. Já a variável L é a largura total de um corredor e da estrutura de armazenagem. O custo de movimentação do ponto de partida/chegada (P/C) é dado por $w(c+1)L$ onde as coordenadas do ponto de P/C são dadas por $(0;0)$. Este ponto de partida/chegada (P/C) normalmente é o ponto de entrada e saída da área do armazém.

Figura 13: Coordenadas dos locais de armazenagem perante o ponto de partida e chegada (P/C)



Fonte: Malmberg *et. al.* (1986)

Para calcular o custo de *picking*, devem-se considerar as distâncias percorridas do ponto P/C até o local de armazenagem do item, somada a sua distância esperada para retornar ao ponto inicial. Estas distâncias são calculadas através do número de operações de armazenagem para o produto j na localização (c,l) em cada período de tempo, que é dada através da frequência de ordens d_j e a proporção do item j no local (c, l) , que pode ser vista na equação 23:

$$d_j \left[X_{c,l,j} / \left(\sum_c \sum_l X_{c,l,j} \right) \right] \quad (23)$$

Quando ocorrer uma situação de *picking* em uma determinada localização $(c;l)$, o custo esperado desta viagem até $(c';l')$ e o retorno ao ponto de partida/chegada é:

$$w^* L \left[\sum_{(c';l') \neq (c;l)} |c - c'| + |l - l'| + (c' + l') \right] P_{c',l'} \quad (24)$$

Onde $P_{c',l'}$ é a probabilidade do espaço $(c';l')$ ser acessado aleatoriamente, tanto para coleta como para guarda de itens. Neste modelo, esta probabilidade é dada pela razão do número de transações por período de tempo para os itens armazenados na localização $(c;l)$, pelo número total de transações no período, ou simplesmente:

$$P_{c,l} = \left(\sum_j d_j \left[X_{c,l,j} / \sum \sum (X_{c,l,j}) \right] \right) / \left(\sum_j d_j \right) \quad (25)$$

Usando esta relação, o custo total para uma operação de *picking* e ou de armazenagem é dada por:

$$\sum_c \sum_l \left\{ \sum_j d_j X_{c,l,j} / \left(\sum_c \sum_l X_{c,l,j} \right) * wL \left[\left(\sum_{(c';l') \neq (c;l)} |c - c'| + |l - l'| + (c' + l') \right) \right] \right. \\ \left. \left(\sum_j d_j \left[X_{c,l,j} / \sum \sum (X_{c,l,j}) \right] \right) / \left(\sum_j d_j \right) \right\} \quad (26)$$

Assume-se assim que não há nenhuma incompatibilidade com as restrições, a formulação para armazenamento e *picking* de itens, somados ao custo de movimentação é dada por:

$$\min z = \sum_j A d_j n_j / \left(\sum_c \sum_l X_{c,l,j} \right) + IC_j \left(\sum_c \sum_l X_{c,l,j} \right) / 2 \\ + \sum_c \sum_l \left\{ \sum_j d_j X_{c,l,j} / \left(\sum_c \sum_l X_{c,l,j} \right) * \right. \\ \left. wL \left[\left(\sum_{(c';l') \neq (c;l)} |c - c'| + |l - l'| + (c' + l') \right) \right] \right. \\ \left. * \left(\sum_j d_j \left[X_{c,l,j} / \sum \sum (X_{c,l,j}) \right] \right) / \left(\sum_j d_j \right) \right\} \quad (27)$$

Sujeito as seguintes restrições:

$$\sum_j X_{c,l,j} \leq M \quad c=1,...,C; l=1,...,L \quad (28)$$

$$X_{c,l,j} \geq 0 \quad c=1,...,C; l=1,...,L; j=1,...,N \quad (29)$$

No exemplo citado por Malmborg *et al.* (1986) pode-se observar que o problema acaba tendo grandes proporções com relação às variáveis e por isso, foi sugerido pelos autores uma solução heurística para solucionar o mesmo com maior rapidez. Esta necessidade de resposta rápida é pelo fato de que este tipo de problema é comum e acontece de forma cotidiana nos armazéns, necessitando assim uma resposta rápida na solução do mesmo para que os gestores possam ter tempo hábil de resposta em suas operações.

Para solucionar este modelo inicialmente deve-se encontrar o lote econômico de compra (LEC) para cada item j , que determinará o tamanho dos lotes a serem armazenados. Este resultado servirá para realizar o cálculo do COI. Assim, para o cálculo do LEC para cada item j , tem-se:

$$LEC_j = \left[\frac{2Ad_j n_j}{IC_j} \right]^{1/2} \triangleq \left(\sum_c \sum_l X_{c,l,j} \right) \quad (30)$$

Para calcular o COI para cada item j , deve-se seguir a seguinte fórmula:

$$COI_j = v_j n_j d_j T_j / d_j = v_j n_j T_j \quad (31)$$

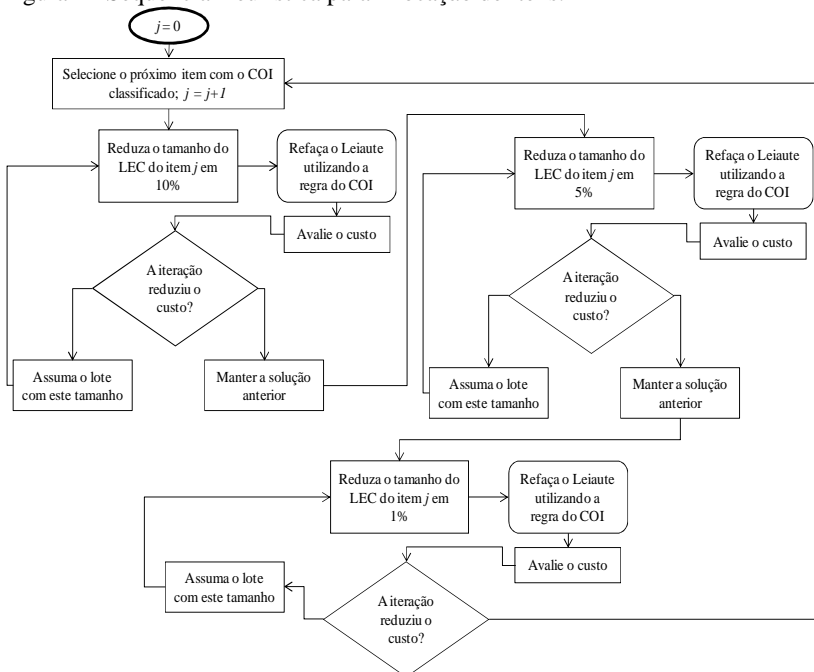
A lógica deste processo classifica os itens em ordem crescente de COI. Uma vez classificado aloca-se os itens com os valores mais baixos de COI próximos ao ponto de Partida/Chegada do armazém, uma vez que estes itens possuem a maior movimentação dentro do armazém. Reduzindo assim as distâncias percorridas para colocá-los e ou retirá-los.

Para solucionar este modelo, Malmborg *et al.* (1986) propuseram um procedimento heurístico baseado na regra do COI. Este procedimento considera que o estoque médio de um item sempre será menor que seu lote de compra. Sendo assim, este procedimento realiza a

redução gradativa dos níveis de estoque dos itens a partir do LEC, conforme demonstrado na figura 17.

Este procedimento heurístico é realizado em três passos de redução do LEC, sendo 10%, 5% e 1% gradativamente. Esta redução gradativa ocorre somente quando há redução dos custos de movimentação, e ocorre até não haver mais itens a serem reduzidos seus lotes iniciais.

Figura 14 Sequencia Heurística para Alocação de Itens.



Fonte Malmberg *et al.* (1986)

Este modelo apresentado por Malmberg *et al.* (1986) é muito utilizado na solução de problemas de leiaute relacionados a alocação de itens em estruturas existentes. Ele demonstra um modelo que utiliza a indexação do volume para atribuir a melhor alocação dos itens.

Outras pesquisas podem ser vistos relacionadas com a alocação de itens em estruturas existentes. Harila *et al.* (2007), Hou *et al.* (2010) e Roodbergen & Koster (2001), descrevem um modelo heurístico para criar políticas de alocação do estoque baseados no volume em estruturas existentes. Já Huertas *et. al* (2007), aplicam um modelo para avaliar o

leiaute de armazéns de grande capacidade, considerando suas alocações e distâncias percorridas.

O modelo de Huertas *et. al* (2007) é bem difundido pelo fato de ter criado um modelo heurístico que inclui avaliação de indicadores no final, o que facilita avaliar se houve melhoria no modelo proposto. Além disso, este modelo compara com facilidade diferentes configurações de leiaute, sempre com relação à variação nos métodos de alocação dos itens.

Os modelos de alocação baseados em estruturas existentes, apesar de diferirem, apenas consideram o volume de movimentações de cada item para melhor aloca-los dentro destas estruturas.

2.8.3 Alocação Através de Políticas de *Picking*

Os modelos baseados em políticas de *picking* utilizam os métodos de separação como forma de melhor alocar os itens em estruturas pré-estabelecidas.

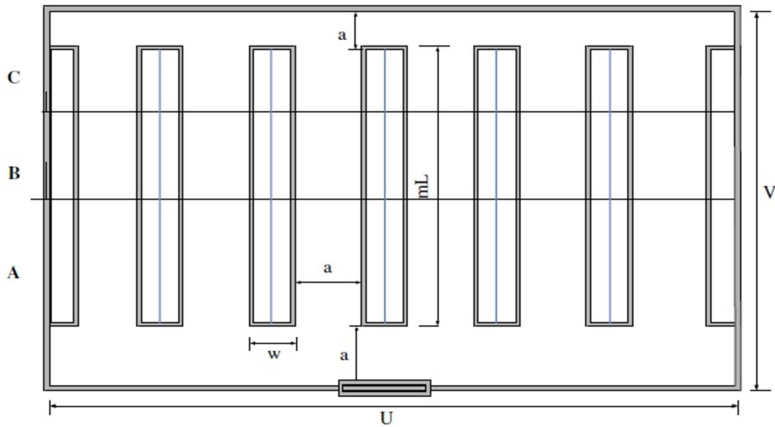
Henn & Wascher (2012), Heragu e Kusiak (1991) e Liu (2004) apresentam modelos que utilizam as políticas de *picking* para atribuir a alocação dos itens nas estruturas existentes. Esta política de separação dos itens pode modificar o método em que estes são armazenados, tornando o modelo necessário para todas as vezes que existam mudanças no perfil da demanda.

Bhaskaran & Malmberg (1989) identificam alguns *trade off's* ao analisar a relação do espaço para armazenagem, considerando a redução das distâncias percorridas através da melhor alocação dos itens, considerando suas relações probabilísticas de chegada e saída dos itens. Ou seja, no momento em que se realizar uma atividade de armazenagem ou de separação de produtos, o veículo que realiza a separação vai a mais de um endereço dentro do armazém. O controle da expedição é regulado pela quantidade de pedidos de clientes. Assim, em apenas uma rota de *picking* pode-se realizar uma quantidade maior de separação de pedidos. Portanto, duas políticas de controle da expedição/ *picking* de materiais podem ser analisadas. Este modelo utiliza a probabilidade como meio de melhorar o serviço prestado em um armazém. Este serviço é definido pela combinação entre as filas existentes, recepção de produtos e expedição. Entretanto, este modelo considera apenas estas três situações, não operando com custos relacionados ao deslocamento interno do armazém.

Já o modelo apresentado por ÖNÜT *et. al* (2008) foi desenvolvido considerando as distâncias percorridas pelos equipamentos de movimentação e aloca os materiais através das políticas de *picking*.

A função objetivo do modelo é constituída a partir das distâncias médias entre as três dimensões e o local de manuseio de materiais. A figura 18 apresenta o armazém denotando os parâmetros do modelo matemático.

Figura 15 Modelo do armazém com as notações para o modelo matemático



Fonte: Öñüt *et al* (2008)

A figura 18 apresenta o armazém com suas dimensões de comprimento (U) e largura (V). Também é possível observar os parâmetros de largura dos corredores internos (a) bem como as dimensões de comprimento (mL) e largura (w) de uma estante de armazenagem. Os pontos de delimitação de A , B e C referem-se aos pontos de armazenagem para os produtos das classes A , B e C .

A doca deve estar localizada no meio da entrada do armazém, ou seja, a distância deste local deve ser a metade. Também se deve considerar que a probabilidade de transportar um item para o lado direito ou esquerdo da porta de entrada deve ser igual, sendo assim, a equação que demonstra a distância media é:

$$T_u = \frac{U}{4} \quad (32)$$

Onde:

- Tu : Distância media no eixo horizontal;
- u : comprimento total do armazém.

Já para o eixo vertical, este depende da probabilidade que um pedido tem em coletar itens das classes A, B e C. Assim sendo, a formulação matemática é:

$$T_v = \left[a + \frac{m}{K} L \left[(Na + Nb) \left(1 - \frac{Pa}{2} \right) + \frac{Pc}{2} (Nb + Nc) - \frac{Nb}{2} \right] \right] \quad (33)$$

Onde:

- Tv : Distância media no eixo vertical;
- a : comprimento dos corredores;
- m : numero total dos espaços de armazenagem;
- K : Capacidade total do armazém em espaços de armazenagem;
- L : comprimento do palete;
- Ni : Numero total de espaços para produtos do tipo i (classificação A, B e C);
- Pi : Probabilidade de ocorrer uma ordem para produtos do tipo i (classificação A, B e C);

Por sua vez, a fórmula da última dimensão, a da altura, é:

$$T_h = \frac{H}{2} \quad (34)$$

Para encontrar a função objetivo, devem-se multiplicar as distâncias totais nos três eixos pelo custo do manuseio dos materiais, a saber:

$$C = 4dC_h \left[a + \frac{m}{K} L \left[(Na + Nb) \left(1 - \frac{Pa}{2} \right) + \frac{Pc}{2} (Nb + Nc) - \frac{Nb}{2} \right] + \frac{u}{4} + \frac{h}{4} \right] \quad (35)$$

As restrições do modelo são dadas na equação 36. A primeira restrição satisfaz a questão da demanda anual e as demais, referem-se ao dimensionamento do armazém nas três dimensões.

$$\begin{aligned}
 K - 2mnh &= 0 \\
 m &\geq 1 \\
 n &\geq 1 \\
 h &\geq 1 \\
 u &= n(w + a)
 \end{aligned}
 \tag{36}$$

Aqui as variáveis de decisão são: m , n , h . Estas variáveis determinam o número de espaços necessários nas três dimensões, determinando quantos espaços totais estão disponíveis no armazém.

A partir deste modelo, utiliza-se a otimização *Particle Swarm*. Este algoritmo testa uma infinidade de posições, uma de cada vez, buscando a melhor alocação dentro do sistema de armazenagem. Um algoritmo padrão pode ser visto na figura 19.

Figura 16 Modelo padrão “*Particle Swarm*”

Inicialização (para $k = 0$)

Para $i = 1$ até N

Atribua partículas aleatoriamente nos espaços (x_i^k)

Gere uma solução inicial $S(x_i^k)$

Atribua $Pbest_i$ = solução inicial $S(x_i^k)$

Atribua $Gbest_i$ = a melhor solução obtida dentre todas as partículas

Gere a velocidade inicial aleatoriamente (V_i^k)

Adicione velocidade às partículas correspondentes (x_i^{k+1})

Melhore a solução

Determine a massa de inércia (W_{ki})

Para $i = 1$ até N

Aumente a velocidade (V_i^k)

Modifique a posição atual (x_i^{k+1})

Finalize o algoritmo ($k = iter_{max}$)

Atribua o $Gbest_i = Ubest$ e pare.

Fonte: Öñüt *et al* (2008)

Os requisitos deste algoritmo são:

- A posição da i_n partícula na k_n iteração é x_i^k ($k=0,...$, iteração máxima; $i=1,...,n$);
- A velocidade da partícula i na iteração k : V_i^k ,
- A melhor posição para a partícula i : $Pbest_i$,
- Melhor posição do grupo: $Gbest$.

A velocidade de cada partícula é alterada de acordo com a seguinte fórmula:

$$V_i^{k+1} = X \left(w * V_i^k + C_1 * (Aleatório) * (Pbest_i - x_i^k) + C_2 * (aleatório) * (Gbest_i - x_i^k) \right) \quad (37)$$

Onde:

- w : função de inércia;
- Ci : Fator de inércia;
- Aleatório: Numero aleatório;
- X : Fator de Restrição

O valor da inércia da equação altera a cada iteração. Esta alteração é baseada na lógica do decréscimo do valor para o valor mínimo de acordo com a função da inércia. O objetivo é convergir a diminuição com a velocidade criada nas iterações posteriores, portanto, resultados mais semelhantes podem ser obtidos. A função da inércia é obtida através da formula:

$$w = w_{\max} - \left(\frac{w_{\max} - w_{\min}}{iter_{\max}} \right) * k \quad (38)$$

Onde:

- $wmax$: força inicial da inércia;
- $wmin$: força de inércia mínima;
- $iterMax$: número máximo de inércias.

Os valores do fator de inércia (Ci) e das forças de inércia ($wmax$ e $wmin$) foram estudados por Shi & Eberhart (1998a, 1998b). Eles

descobriram que estes valores não devem ser alterados de uma aplicação para a outra. Fixaram estes valores em $Ci = 2$, $wmax = 0.9$ e $wmin = 0.4$.

A posição das partículas é alterada pela velocidade conforme:

$$x_i^{k+1} = x_i^k + vx_i^{k+1} \quad (39)$$

Para cada uma das dimensões é necessário refazer a iteração. Este tipo de algoritmo possui algumas restrições e dificuldades, mas na utilização de alguns modelos, como: rede neural, sistema de controle *fuzzy*, entre outras, este modelo tem obtido sucesso (SHI & EBERHART, 1998a).

Apesar da grande quantidade de pesquisas encontradas na literatura consultada, os modelos sofrem variações apenas no método da solução desta alocação, mas sempre consideram os dados e informações de entrada e saída de cada item.

2.8.4 Movimentação de Materiais

A movimentação de materiais possui poucas pesquisas dentre as analisadas, pois as mesmas limitam-se apenas a modificar algumas políticas de *picking*, realizando aproveitamento de viagens de ida e volta. Os algoritmos baseados na geometria oferecem soluções para os problemas de movimentação de materiais e são baseados na teoria Euclidiana e teoria de Lebesg. Estas aplicações podem ser vistas nos trabalhos de Corley & Roberts (1972) e Thornton *et al.* (1979). Corley & Roberts (1972) são precursores na otimização da movimentação de materiais em armazéns e nesta pesquisa apresentam um modelo baseado em geometria para redução da movimentação de materiais.

Já Prantstetter *et al.* (2009) apresentam um algoritmo híbrido para um armazém de peças de reposição na melhoria da movimentação de materiais, visando a redução das distâncias percorridas no armazém.

Gong & De Koster (2009) utilizam um modelo baseado na probabilidade para encontrar um pedido com lote ótimo para armazéns com corredores paralelos, buscando a melhor alocação dos itens para reduzir a movimentação de materiais.

Chang & Wen (1997) apresentam um modelo analítico para obter a melhor configuração dos *racks* em um sistema automatizado de separação, reduzindo assim a movimentação de materiais.

Normalmente os pesquisadores relacionam a movimentação de materiais com as políticas de *picking* e ou com métodos de alocação, demonstrando assim, porque poucas pesquisas são encontradas de forma pura na melhoria da movimentação.

2.8.5 Alocação de Itens Blocados

A alocação de itens bloqueados é de suma importância para que se minimizem as movimentações desnecessárias, visto que neste sistema, é comum ocorrer o bloqueio de produtos por outros e a necessária movimentação destes para que se alcance o produto desejado. Portanto, a correta alocação destes, minimiza e muito a quantidade de movimentação desnecessária.

Wang *et al.* (2011), apresentam um modelo redirecionado, para concepção do leiaute, baseados em algoritmos geométricos para solucionar problemas de alocação de itens bloqueados. Assim, eles propuseram uma alteração neste modelo padrão (baseado na geometria), que englobam as restrições e variáveis apresentadas pelos problemas relacionados a leiaute. Esta alteração propiciou a utilização de mais variáveis de estudo, correlacionando a alocação de itens com as políticas de *picking*.

Por sua vez, Dunker *et al.* (2005) utilizam a programação dinâmica para melhorar a movimentação de materiais através da alocação de itens bloqueados. Já Heragu & Srinivasan (2011) analisam um sistema de estocagem de produtos semimanufaturados através de redes e filas, onde a blocagem de materiais é utilizada como forma de armazenagem.

Scholz *et al* (2010) apresentam um modelo algoritmo para otimização do leiaute de itens bloqueados reduzindo as filas de espera para separação.

Apesar da importância dos itens bloqueados, pouco se estuda este tipo de armazenagem, tendo em vista que muitas empresas optam pela utilização de sistemas de armazenagem do tipo porta-paletes, que melhoram sensivelmente a seletividade e resolvem definitivamente o problema de bloqueio de mercadorias.

2.8.6 Alocação de Itens em Armazéns multi níveis

A alocação de armazém multi níveis não somente considera as estruturas que verticalizam o armazém, como armazéns que possuem mais de um piso de armazenagem.

ÖNÜT *et al.* (2008), apresentam um algoritmo modificado do *Particle Swarm* para otimizar o leiaute dos armazéns. Este algoritmo introduz uma novidade que é não somente a consideração da posição bidimensional, mas sim, tridimensional, considerando a altura que estes itens podem ser armazenados. Assim sendo, este modelo apresenta uma solução ideal para armazenamento em uma estrutura de estocagem, considerando o comprimento, largura e altura que este item pode ser armazenado.

Zhang & Lai (2006) propuseram um modelo que também considera armazéns com múltiplos andares de estocagem, sendo considerado um modelo tridimensional. Este modelo combina um algoritmo genético com um sistema de ligação entre uma ou mais soluções.

Neste modelo, o objetivo é minimizar o custo total de transporte tanto na horizontal como na vertical. A função objetivo é baseada na programação inteira e é dada por:

$$\sum_{j=1}^J \sum_{l=1}^L \sum_{k=1}^{K_l} Q_j (D_{lk} C_j^h + C_{jl}^v) x_{jlk} \quad (40)$$

s.a.

$$\sum_{l=1}^L \sum_{k=1}^{K_l} x_{jlk} = 1, \text{ para } j = 1, \dots, J, \quad (41)$$

$$\sum_{j=1}^J S_j x_{jlk} \leq A, \text{ para } l = 1, \dots, L, k = 1, \dots, K_l, \quad (42)$$

$$x_{jlk} = 0, 1, \forall j, l, k. \quad (43)$$

Onde:

- $j \in \{1, 2, \dots, J\}$: índice para os tipos de produtos;
- $l \in \{1, 2, \dots, L\}$: índice para os níveis de armazém;
- Q_j : demanda mensal para o item tipo j ;
- S_j : necessidade de inventário do item tipo j ;
- C_j^h : custo unitário de transporte horizontal do item tipo j ;
- C_{jl}^v : custo unitário de transporte vertical do item j para o nível k ;

- A : capacidade de armazenagem de uma célula de armazenagem;
- D_{lk} : distância horizontal da célula k no nível l para o local de entrada/saída ou elevador.
- x_{jlk} : variável de decisão; se igual a 1, o item j é armazenado na célula k no nível l ; se for 0, ao contrário.

A restrição da equação 41 indica que cada produto será alocado em um local de armazenagem e a restrição da equação 42 aponta que nenhuma capacidade de local deva ser violada. A equação 43 aponta que o problema é uma programação binária.

Para solucionar este modelo, uma classe de algoritmos genéticos foi desenvolvida por Zhang *et. al.* (2002). Um desses modelos é o BGA, onde são comparados os dois novos e os dois antigos cromossomos e selecionado o melhor entre os dois em operações cruzadas. Este método superou os outros testados por Zhang *et. al.* (2002).

Neste caso, Zhang e Lai (2006) propuseram um caminho heurístico para solucionar este método do algoritmo genético. A este método nomearam como “*path-relinking*” que mapeia uma sequência de leiautes e computam seus custos de deslocamento para validar qual a melhor solução.

Os armazéns multi níveis possuem boas soluções que servem de base para a presente pesquisa, visto que a verticalização e horizontalização só podem ser consideradas quando trabalhada com armazéns que possuem a parte tridimensional em suas posições de armazenagem.

2.8.7 Configuração dos corredores de acesso

A configuração de corredores de acesso demonstra como estes devem ser introduzidos nas estruturas de armazenagem a fim de reduzir distâncias percorridas e em alguns casos, melhorar a ocupação do armazém.

Lerher *et. al.* (2007) apresenta o dimensionamento de uma estrutura para transelevadores, validando o modelo apenas no quesito da quantidade de transelevadores a utilizar e a produtividade do armazém.

Montreuil & Ratliff (1989) utilizam o modelo do tipo cut tree para elaborar um método que auxilie os projetistas na construção de leiautes mais eficientes, introduzindo mais ou menos corredores de acesso e ou *picking*.

Em outra pesquisa, Gue & Meller (2009) apresentam um novo conceito de disposição dos corredores de acesso, onde estes possuem um formato angular entre os seus cruzamentos, o que demonstra nesta pesquisa uma redução de até 20% na movimentação dos equipamentos.

Independente do tipo de sistema a ser projetado, os corredores de acesso podem melhorar a seletividade dos produtos, bem como aumentar a eficiência dos equipamentos de movimentação. Para definir qual modelo utilizar, o gestor e ou projetista de um armazém deve levar em consideração todas as variáveis vista na seção 2.8, a qual possuem muitas variáveis a serem consideradas.

3 MODELO PROPOSTO

A ideia deste modelo é auxiliar os administradores a tomarem decisões referentes a como construir armazéns para estocagem e obter a melhor relação custo benefício. Estas decisões estão relacionadas a algumas variáveis que impactam diretamente no desempenho das operações. Dependendo da escolha do sistema de armazenagem e dos equipamentos de movimentação, pode-se aumentar ou diminuir o *trade-off* entre os custos de implantação e os custos de operação. Por exemplo, estas escolhas podem aumentar ou diminuir o tamanho necessário do terreno a ser utilizado, o tamanho da construção no plano horizontal e vertical e, por sua vez, aumentar ou diminuir as distâncias percorridas durante a operação dos armazéns.

Assim, o modelo proposto será aplicado para armazéns de múltiplos níveis, que se utilizam de estruturas porta-paletes para armazenagem.

3.1 CONSIDERAÇÕES INICIAIS

Para que o modelo se torne válido algumas premissas e considerações são necessárias:

- O armazém analisado possui estruturas do tipo porta paletes de simples profundidade;
- Os paletes são padrões para armazenagem e seu volume é computado através de medidas fixas;
- Os equipamentos de movimentação irão aumentar ou diminuir o tamanho dos corredores de movimentação, bem como, aumentar ou diminuir a altura das estruturas de armazenagem;
- Existe apenas um ponto de entrada e saída do espaço de armazenagem, ficando exatamente no lado esquerdo da largura do armazém; esta atribuição é apenas para padronização das distâncias e relações geométricas.
- As movimentações internas dos produtos, para efeito de cálculo, serão consideradas constantes com um giro de produto a ser atribuído.
- O armazém ainda não foi construído e o terreno também não possui limitações de espaço.

- Os produtos são considerados apenas em unitização do tipo palete com carga máxima de 1.500 kg;
- O volume de movimentação no armazém é considerado constante para os itens com um giro de entrada/saída a ser atribuído, não considerando a política de picking neste caso.

3.2 CONSIDERAÇÕES INICIAIS DE CUSTOS

Para iniciar a construção do modelo, devem-se considerar alguns custos relacionados à abertura de um armazém. Estes custos para a abertura de um armazém (*CAA*) são relacionados à construção civil (*CC*) e à operação (*CO*). Assim, pode-se validar a seguinte equação:

$$CAA = CC + CO \quad (44)$$

Os custos de construção estão relacionados com os custos de construção do prédio (*CP*), custo de aquisição do sistema de armazenagem (*CA*), custo de aquisição do sistema de movimentação (*CM*), e o custo do terreno (*CT*). Assim, pode-se dizer que os custos de construção dos armazéns são dados por:

$$CC = CP + CA + CM + CT \quad (45)$$

Os custos de operação de um armazém estão relacionados com os custos fixos (*CFo*) e variáveis (*CVo*) para operar o armazém. Assim, pode-se dizer que o custo de operação é dado por:

$$CO = CFo + CVo \quad (46)$$

Os custos fixos e variáveis dependerão de vários fatores relacionados aos custos de abertura do armazém, visto que estes são considerados como a depreciação dos bens físicos nos custos fixos. Assim, armazéns verticalizados podem custar mais para construir, em detrimento de um custo menor de operação, e vice-versa. Portanto, pode-se afirmar que os custos de construção impactam diretamente os custos de operação, dependendo dos sistemas de armazenagem e movimentação escolhidos, bem como os custos de construção do prédio podem variar dependendo das escolhas realizadas.

Como será visto mais adiante, os custos iniciais dos equipamentos de movimentação (*CM*) são incluídos como custos fixos

de operação do armazém, uma vez que sua depreciação é considerada na equação total, portanto:

$$CC = CP + CT + CA \quad (47)$$

$$CO = CFo + CVo \quad (48)$$

Portanto, o foco principal nesta análise é validar o custo total apresentado através das escolhas dos sistemas de armazenagem e movimentação, bem como da construção do prédio (verticalizado ou horizontalizado) e aquisição do terreno.

3.3 DEFINIÇÃO DA QUANTIDADE DE POSIÇÕES PALETES

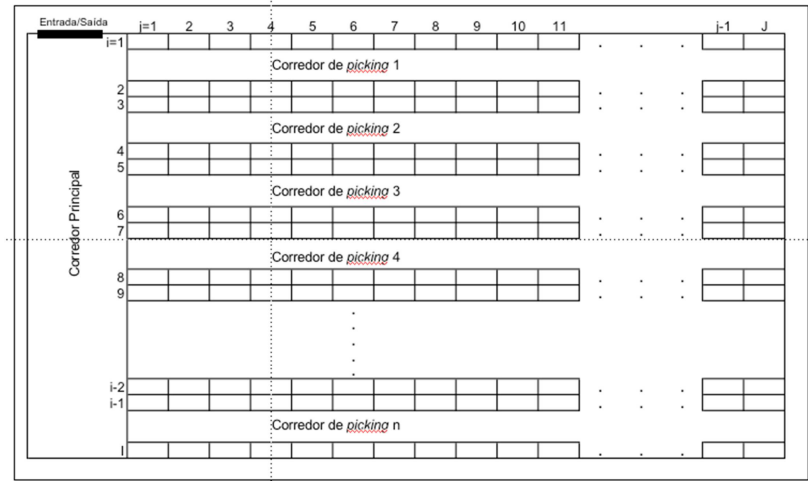
A partir destas premissas, considera-se que para o modelo é necessária a definição da quantidade de espaços (paletes) que serão necessários no armazém. Assim, define-se que Q é a quantidade ideal de posições paletes necessárias para o armazém.

Uma vez definida a quantidade de posições paletes necessárias para o dimensionamento do armazém, pode-se definir um modelo matemático que indique qual a disposição das estruturas em relação ao número de corredores de armazenagem, a quantidade de posições paletes por corredores e a altura de cada estrutura.

A figura 20 apresenta a disposição de um típico armazém onde se pode verificar que as estantes de estruturas porta-paletes são denominadas variável i e cada posição de armazenagem nesta estrutura, denomina-se j . Para os níveis em altura de cada posição, utiliza-se a variável k como denominação.

Uma vez definida que cada posição paleta dentro de um armazém possui um endereço i , j e k , podem-se definir para cada uma destas posições suas respectivas distâncias da porta de entrada e saída da área de armazenagem. Estas distâncias são de fundamental importância para o cálculo dos custos de operação e dos custos de construção.

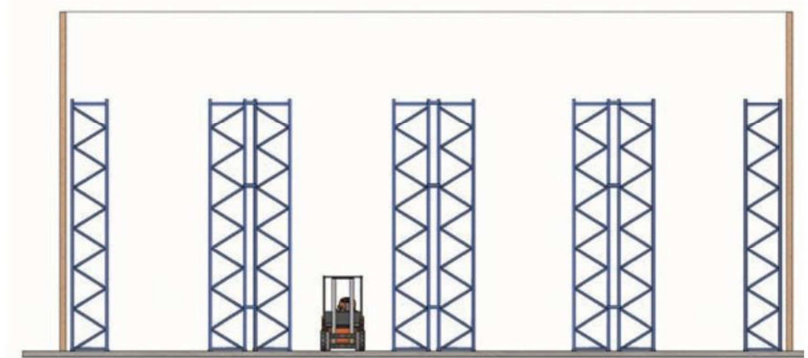
Figura 17 Disposição típica de um armazém



3.4 ESCOLHA DO TIPO DE ESTRUTURA

Outra definição importante das estruturas é a escolha do tipo de sistema, se convencional de armazenagem ou de dupla profundidade. O sistema convencional de armazenagem é formado por uma estante simples encostada às paredes laterais e por estantes centrais duplas. Neste caso, possui apenas uma posição palete para cada lado do corredor de *picking*, conforme figura 21.

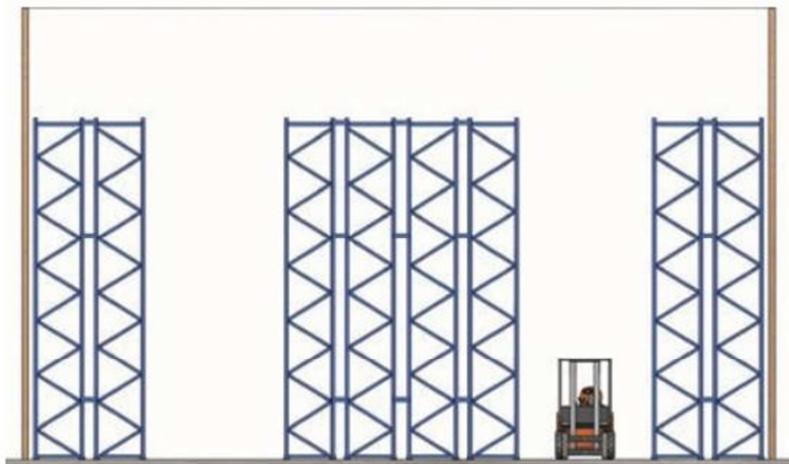
Figura 18 Sistema de armazenagem convencional



Fonte: Adaptado de: Mecalux (2011)

Já o sistema de dupla profundidade possui duas posições paleta de cada lado do corredor, conforme demonstra a figura 22. Este tipo de disposição apresenta uma seletividade menor em relação à armazenagem convencional, entretanto, aumenta a ocupação do armazém, diminuindo a quantidade de corredores. Por outro lado, equipamentos especiais são necessários para movimentar os produtos, bem como estes não são indicados para armazenar produtos diferentes na mesma posição, devido à necessidade de movimentação adicional para conseguir acessibilidade.

Figura 19 Sistema duplo de armazenagem



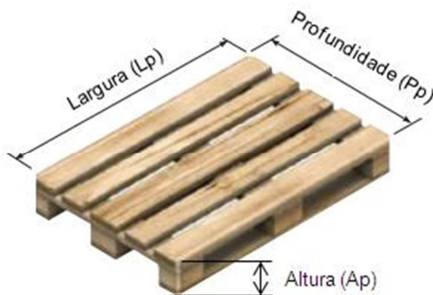
Fonte: Adaptado de: Mecalux (2011)

Indiferente do tipo de sistema de armazenagem, convencional ou duplo, as distâncias percorridas dependem única e exclusivamente das dimensões de cada estante porta-paletes, dos corredores de *picking* e do corredor principal.

3.5 DIMENSÕES DAS ESTRUTURAS

Inicialmente devem-se definir as dimensões dos paletes a serem utilizados na estrutura, bem como o lado em que os mesmos serão armazenados no sistema. Assim, defini-se para o paleta como Altura (A_p), Largura (L_p) e Profundidade (P_p), convencionando que a largura do paleta é o lado de movimentação do mesmo (Figura 23).

Figura 20 Notação das dimensões do Palete



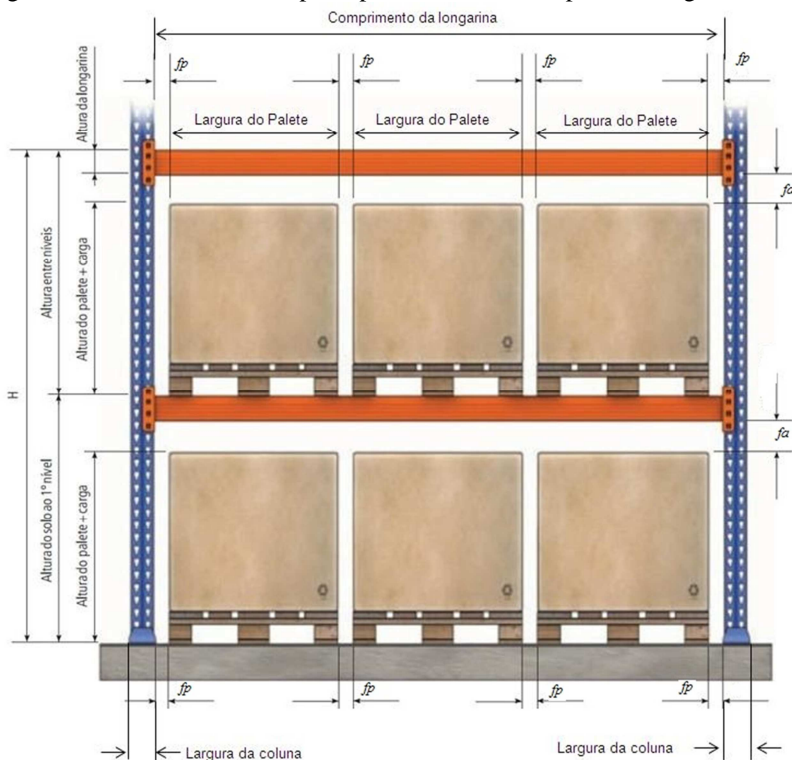
As estruturas do tipo porta-paletes são construídas de forma modular e apresentam colunas de sustentação e longarinas como seus principais componentes. Estas longarinas fazem a junção de cada coluna de sustentação e também servem como base para o apoio dos paletes nos níveis superiores (MECALUX, 2011).

Esta longarina pode ser dimensionada para que caibam entre duas colunas mais de um palete, minimizando assim a ocupação de espaço dentro do armazém. As dimensões destas longarinas são consideradas em projeto estrutural, a qual realiza compensação de carga e esforço dos componentes metálicos.

Uma vez definida em projeto estrutural a quantidade de paletes entre colunas (sob uma longarina) deve-se incluir todas as folgas do sistema, nomeando este como um conjunto de armazenagem. A figura 24 apresenta a estrutura com suas respectivas folgas pela vista frontal do sistema de armazenagem (conjunto de armazenagem). Neste caso, as seguintes notações adicionais devem ser consideradas:

- Folga entre paletes e paletes-colunas (fp);
- Folga na altura (fa);
- Altura entre níveis (He);
- Altura da carga (Acg);
- Altura total do sistema (H).

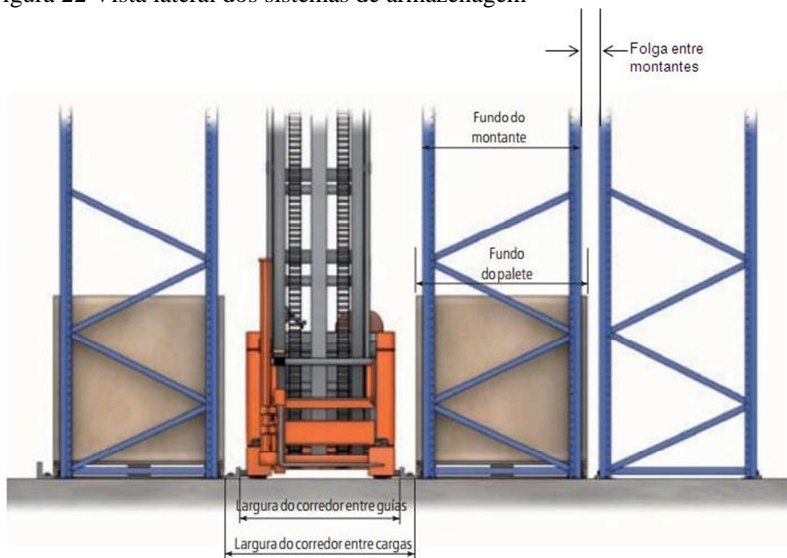
Figura 21 Medidas frontais do porta-paletes com suas respectivas folgas



Fonte: Adaptado de: Mecalux (2011)

Através da vista lateral, deve-se encontrar qual a medida existente para a profundidade de cada estante de armazenagem (Pca). Conforme observado na figura 25, a largura desta estante é definida pela profundidade do paleta (Pp). Pode-se observar também que existe uma folga (fc) entre os paletes que estão posicionados, a qual deve ser considerada quando se for calcular a profundidade do conjunto de armazenagem. Assim, para encontrar esta profundidade, soma-se a profundidade do paleta (Pp) a folga necessária (fc).

Figura 22 Vista lateral dos sistemas de armazenagem



Fonte: Adaptado de: Mecalux (2011)

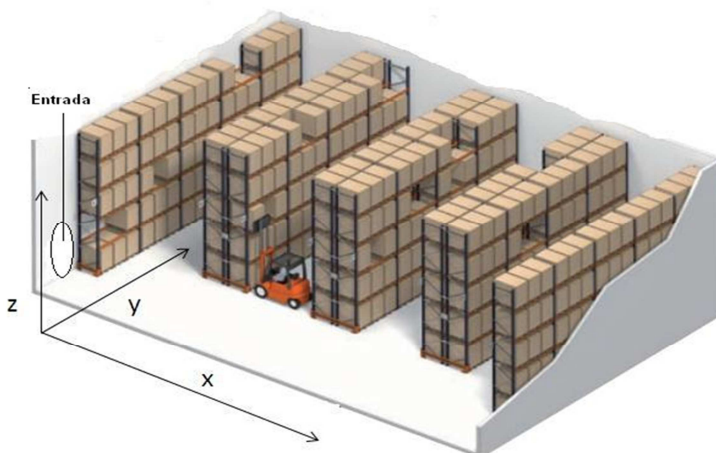
Outra variável necessária para dimensionar um armazém é a medida referente ao corredor de *picking* (L_{cp}), que é a distância entre uma estrutura e outra de armazenagem que serve para o trânsito dos equipamentos de movimentação. Neste caso, esta medida depende única e exclusivamente do tipo de sistema de movimentação escolhido, que pode aumentar ou diminuir a necessidade deste espaço.

3.6 CÁLCULO DAS DISTÂNCIAS PERCORRIDAS

Com base nestas notações e informações do subitem 3.5, consegue-se calcular a distância percorrida para cada posição paleta, nos eixos x e y (horizontal) e z (vertical) conforme demonstra figura 26.

O cálculo das distâncias utilizam como base o modelo proposto por Önut *et al* (2008), realizando uma adaptação considerando as distâncias reais percorridas e não distâncias medias.

Figura 23 O armazém no plano tridimensional



Fonte: Adaptado de: Mecalux (2011)

A distância percorrida no plano horizontal (d_h) pode ser encontrada através do deslocamento no eixo x e y apontado na figura 26. Assim, pode-se afirmar que estas distâncias dependem da largura e profundidade do conjunto de armazenagem, bem como da largura dos corredores de passagem.

Uma análise a ser realizada é que os conjuntos de armazenagem são faceados pelo mesmo corredor de passagem, podendo-se afirmar que a distância percorrida para os conjuntos 1 e 2 ($i = 1$ e $i = 2$) são iguais. Nesta lógica, a distância para os conjuntos 3 e 4 ($i = 3$ e $i = 4$) também são iguais, e assim sucessivamente até o penúltimo e último conjunto dos sistemas de armazenagem ($i = I-1$ e $i = I$).

Outro ponto a ser considerado é que como já mencionado as estruturas são providas pelas longarinas que armazenam uma quantidade fixa de paletes que pode variar de 1 a np paletes, portanto, neste quesito, não se considera mais a posição-paleta de armazenagem e sim a posição do conjunto de armazenagem (denominado agora como j).

Portanto a distância horizontal d_h , percorrida para cada conjunto de armazenagem, será dada pela distância percorrida no eixo x e no eixo y , a saber:

$$dh_{i,j} = \underbrace{n \times a + Lec \times (ncp - 1)}_{\text{eixo } x} + \underbrace{\frac{Cpp}{2} + \frac{Lc}{2} + Lec \times (j - 1)}_{\text{eixo } y} \quad (49)$$

Onde:

- C_{pp} : Largura do corredor principal de passagem;
- dh : distância horizontal percorrida;
- Lec : Largura entre corredores;
- a : distância da porta de entrada ao corredor 1;
- Lc : Largura do conjunto de armazenagem;
- n_{cp} : número do corredor de *picking*;
- j : número do conjunto de armazenagem;
- n : 1 para sistema convencional e 2 para sistema duplo de armazenagem.

A figura 27 apresenta as notações de um conjunto de armazenagem em um típico modelo de armazém.

O cálculo da largura/distância entre os corredores de armazenagem (Lec) deve ser feito baseado na distância central do corredor $i-1$ até a distância central do corredor i , considerando a profundidade das estruturas e suas folgas, conforme segue:

$$Lec = L_{cp} + n \times P_{ca} \quad (50)$$

Onde:

- L_{cp} : Largura do corredor de *picking*;
- P_{ca} : Profundidade do sistema de armazenagem, incluindo sua folga z ;
- n : 2 para sistema convencional de armazenagem e 4 para sistema duplo de armazenagem.

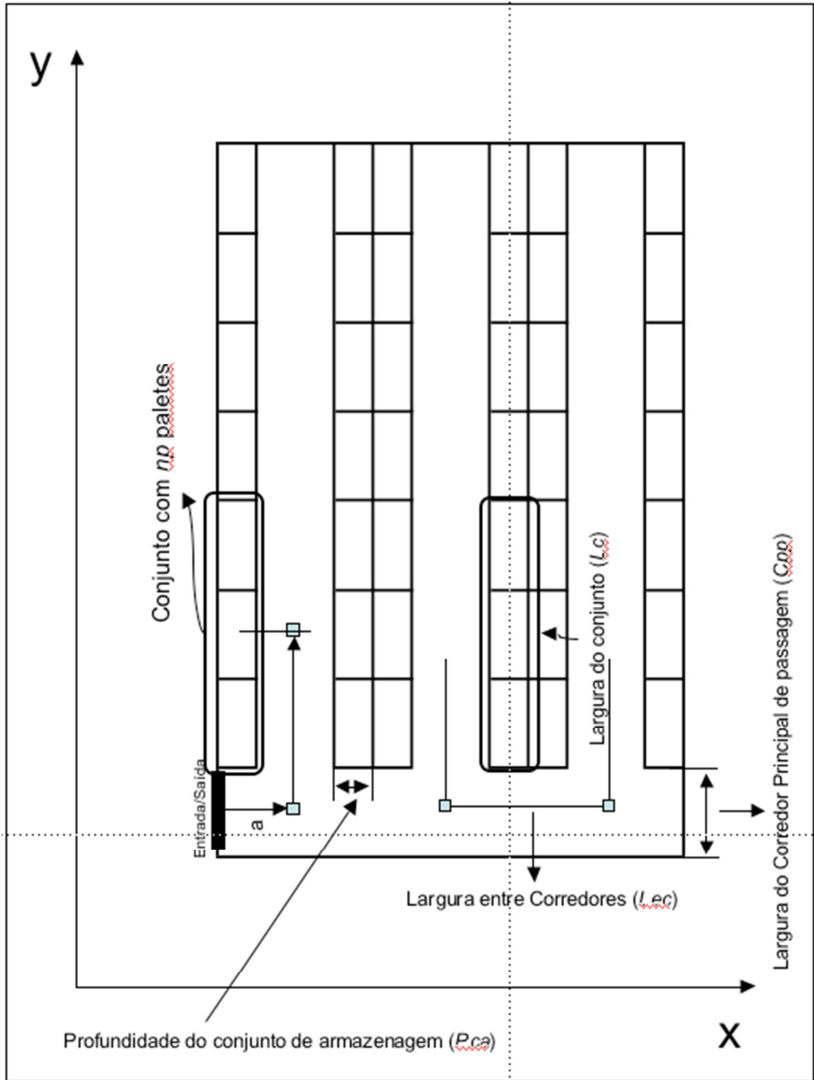
Por sua vez, a largura do conjunto (Lc) depende das dimensões dos paletes, da quantidade de paletes que ficará por conjunto, das folgas de armazenagem e dimensões da estrutura, como segue:

$$Lc = ((2 \times Lcl) + ((np + 1) \times fp) + (Lp \times np)) \quad (51)$$

Onde:

- Lcl : Largura da coluna da estrutura;
- np : número de paletes entre colunas (suportado pela longarina);
- fp : folga entre paletes;
- Lp : Largura de cada paleta na posição de armazenagem.

Figura 24 Notações para o cálculo das distâncias na horizontal



Já a distância da porta de entrada e saída até o primeiro corredor de picking (a) é dada por:

$$a = Pca \times n + \frac{Lcp}{2} \quad (52)$$

Onde:

- Pca : profundidade do conjunto de armazenagem;
- Lcp : Largura do corredor de passagem;
- n : 1 para sistema convencional e 2 para sistema de dupla profundidade.

Definidos os cálculos para o deslocamento horizontal (eixos x e y) pode-se definir o cálculo do deslocamento para o eixo z , que é o cálculo da distância percorrida na vertical. Na prática não é o movimento do equipamento, mas sim o deslocamento do palete em relação à altura, utilizando-se de um elevador do próprio equipamento. Neste caso, o limitante de altura será relativo à capacidade técnica do equipamento.

Assim, para todo $k = 1$, o deslocamento vertical é zero, para os demais níveis de deslocamento $k = 2, \dots, K$, o cálculo do deslocamento vertical (dz_k) é:

$$dz_k = k \times He \quad (53)$$

$$He = Ap + Ac + fa + Al \quad (54)$$

Onde:

- k : nível ou altura da estrutura, $k = 1, \dots, K$;
- He : altura entre níveis;
- Ap : altura do palete;
- Ac : altura da carga;
- fa : Folga entre a carga e a longarina do próximo nível; e
- Al : Altura da longarina.

3.7 DEFINIÇÃO DAS VARIÁVEIS DE DECISÃO

Uma vez definida as distâncias a serem percorridas, pode-se definir a variável de decisão do modelo matemático. Como já mencionado, por questões estruturais, estas estruturas possuem longarinas que permitem a disposição de colunas de sustentação a cada dois, três ou np paletes entre elas, dependendo de peso e medida. Assim, a quantidade de posição palete também necessita da informação de quantos paletes estarão distribuídos dentro de cada longarina. Este espaço será chamado de conjunto, o qual contemplará uma quantidade np de paletes. Assim, tem-se que:

- x_{ijk} = se 1, existirá o conjunto de armazenagem no estante i , conjunto j e nível k , contendo q paletes; e 0 caso contrário;
- Q = número total de posições paletes necessárias.
- np = número de posições paletes dentro do conjunto.
- C = número de conjuntos de armazenagem necessários

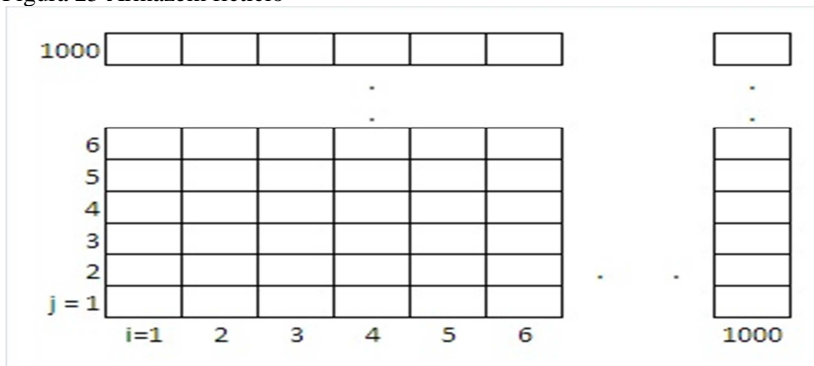
Dessa forma, a quantidade de variáveis x_{ijk} dependerá da quantidade de posições paletes necessárias e conjuntos necessários. Assim, para determinar a quantidade de variáveis do problema tem-se:

$$C = \frac{Q}{np} \quad (55)$$

Inicialmente, o método cria um armazém fictício com $i = C$ corredores e $j = C$ conjuntos de armazenagem em cada corredor. A variável de altura ainda não é considerada neste momento. Por exemplo, em um modelo com necessidade de 1000 posições paletes, criam-se todas estas variáveis sendo $i = 1000$ e $j = 1000$, conforme figura 28.

O modelo não calcula a diferença entre capacidade estática e dinâmica no dimensionamento do armazém, limitando-se a aplicar apenas a capacidade indicada no projeto. Assim, a relação entre capacidade estática e dinâmica do armazém deve ser previamente calculada.

Figura 25 Armazém fictício

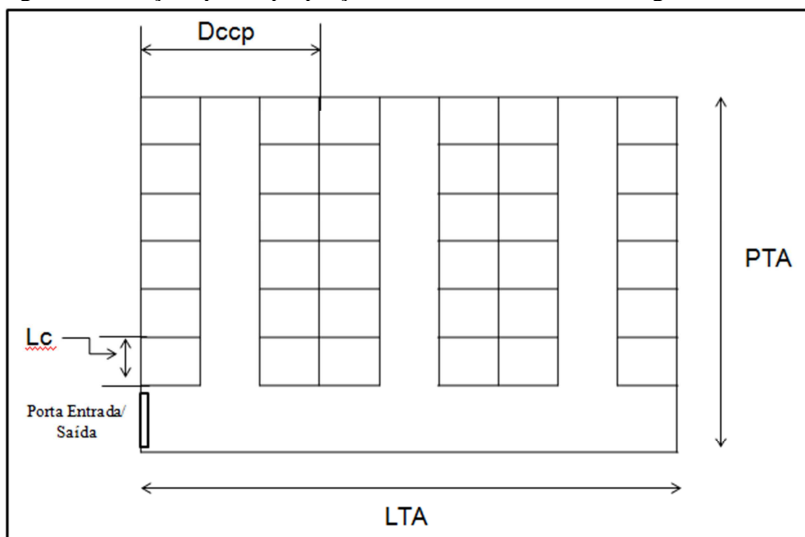


Por questões de deslocamento apontadas tanto por De Koster (2010) como por Novaes (1989), o armazém deve respeitar uma proporção entre a largura e a profundidade do mesmo. Neste contexto, uma adaptação à proporcionalidade é necessária para tornar o modelo

válido, uma vez que a porta de entrada e saída do armazém está definida na lateral do prédio, e não no meio como proposto pelos autores.

Ao se analisar a disposição das estruturas de armazenagem, pode-se verificar que existem algumas medidas padrões, conforme demonstra a figura 29.

Figura 26 Notações para a proporção das estruturas de armazenagem



Pode-se observar que existe uma proporção das dimensões da largura do conjunto de armazenagem (Lc) e as dimensões de profundidade entre dois conjuntos de armazenagem que são separados pelo corredor de picking ($Dccp$).

Ao atribuir os valores para i e j , considera-se que o armazém teria somente um nível, para que todas as possibilidades de configuração das estruturas de armazenagem sejam contempladas. Entretanto, por questões da proporcionalidade de deslocamento, um armazém como o exemplificado jamais assumiria $i = 1000$ ou $j = 1000$. Portanto, para limitar as variáveis em i e j devido à questão da proporcionalidade, tem-se:

$$I = \frac{\sqrt{C \cdot Lc \cdot Dccp}}{Dccp} \quad (56)$$

$$J = \frac{\sqrt{C \cdot Lc \cdot Dccp}}{Lc} \quad (57)$$

A dimensão entre dois conjuntos de armazenagem separados pelo corredor de *picking* (*Dccp*) é calculada considerando a profundidade do conjunto de armazenagem e a largura do corredor, a saber:

$$Dccp = Pca \cdot n + Lcp \quad (58)$$

Onde:

- *C*: conjunto de armazenagem contendo *q* paletes;
- *Lcp*: Largura do corredor de *picking*;
- *Dccp*: dimensão entre duas estruturas de armazenagem que são separadas pelo corredor de *picking*;
- *Pca*: profundidade do conjunto de armazenagem;
- *n*: 2 para sistema convencional e 4 para sistema duplo de armazenagem.

Uma vez limitada as variáveis *I* e *J* pelas considerações de proporcionalidade, pode-se inserir a variável relativa à altura que terá *K* níveis. Esta última variável é limitada pelo equipamento de movimentação, ou seja, a quantidade de níveis que este equipamento consegue deslocar o material. Considerando as três variáveis, pode-se afirmar que o modelo apresentado terá o seu número de variáveis calculadas conforme a equação a seguir:

$$Nv = I \cdot J \cdot K \quad (59)$$

Onde:

- *Nv*: Número de variáveis do modelo

3.8 DEFINIÇÃO DO MODELO MATEMÁTICO

A modelagem matemática irá indicar qual é a melhor disposição, ou seja, quais serão os números ideais de corredores, conjuntos do sistema e níveis. O modelo apresentado é uma adaptação do modelo apresentado por Zhang & Lai (2006).

Através da variável x_{ijk} , pode-se determinar a quantidade de espaço necessário em cada um dos planos (*x*, *y* e *z*).

Assim, a função objetivo neste caso é dada por:

$$\min z = \sum_{i=1}^I \sum_{j=1}^J \sum_{k=1}^K ht \cdot D_{ijk} (Co_h + Co_v) x_{ijk} + \sum_{i=1}^I \sum_{j=1}^J \sum_{k=1}^K (CC_h + CC_v) x_{ijk} \quad (60)$$

Sujeito a:

$$\sum_{i=1}^I \sum_{j=1}^J \sum_{k=1}^K x_{ijk} \geq C \quad (61)$$

$$x_{ijk} \geq x_{ij(k+1)}, \text{ para } i=1, \dots, I, j=1, \dots, J, k=1, \dots, K \quad (62)$$

$$x_{ijk} \geq x_{ij(k-1)} + x_{i1k} - 1, \text{ para } i=1, \dots, I, j=2, \dots, J, k=2, \dots, K \quad (63)$$

$$x_{i1k} \geq x_{ijk}, \text{ para } i=1, \dots, I, j=2, \dots, J, k=1, \dots, K \quad (64)$$

$$x_{ijk} \geq x_{i1k} + x_{1(j+1)k} - 1, \text{ para } i=2, \dots, I, j=2, \dots, J, k=1 \quad (65)$$

$$x_{1j1} \geq x_{ij1}, \text{ para } i=2, \dots, I, j=1, \dots, J, k=1 \quad (66)$$

$$x_{ijk} = 0,1 \quad \forall i, j, k \quad (67)$$

A primeira parte da equação 60 demonstra os custos relacionados à operação do armazém, com uma demanda fixa para todas as posições necessárias. Esta primeira parte da equação é produto do custo de operação de deslocamento horizontal (Co_h) e a distância percorrida para acessar cada local de armazenagem. Por outro lado, os custos de operação do deslocamento vertical (Co_v), são dados pela distância deslocada em relação à altura. Estes dois custos são influenciados por uma demanda D_{ijk} fixa para todas as posições, incluindo o horizonte de tempo (ht) em que estes custos operacionais serão validados. A segunda parte desta equação somam os custos relativos a construção inicial do armazém (CC_h e CC_v), que limitam-se ao custo do terreno (CT), o custo de construção (CP) e o custo das estruturas de armazenagem (CA).

A restrição da equação 61 aponta qual a necessidade mínima de armazenagem para atribuição das disposições das estruturas bem como espaços necessários do armazém.

A equação 62 demonstra que a estrutura precisa ter o nível $k-1$ para ter o nível k . As equações 63 e 64 demonstram que quando um nível k é utilizado, todas as posições j do corredor i devem possuir o nível k .

As equações 65 e 66 garantem que os corredores i devem ter uma mesma quantidade de posições j ou uma variação de uma posição entre um corredor e outro. A equação 67 apresenta a restrição de que o modelo deve ser binário.

3.9 CONSIDERAÇÕES DE CUSTOS

Uma vez detalhado o modelo matemático, podem-se encontrar os custos relativos à operação, e que impactarão na escolha do sistema correto e suas variáveis. Neste modelo, serão analisados os custos para cada tipo de sistema mecanizado existente (empilhadeira a combustão, elétrica, bilateral e trilateral), realizando uma simulação com os modelos para encontrar o melhor custo benefício no projeto de um armazém.

Os custos de operação (Co) são relacionados à aquisição do equipamento de movimentação e os custos variáveis de operação dos equipamentos de movimentação.

Neste contexto, os custos dos equipamentos de movimentação e das estruturas de armazenagem devem fazer parte dos custos de operação considerando-os como custos fixos de depreciação para cada posição utilizada. Para que se torne viável, este custo terá como base um mês de operação, para que os mesmos possam ser considerados equalizados aos custos de operação. Por último deve-se incluir o horizonte de tempo em que os custos de operação serão considerados, assim tem-se que:

$$CO = Coh + Cov \quad (68)$$

Como o modelo possui uma distinção entre deslocamento horizontal e vertical, esta segregação também se aplica aos custos de operação, sendo Co_h os custos de operação horizontal e Co_v para vertical.

Logo, os custos do sistema de movimentação também devem ser considerados tanto para a posição vertical como horizontal. Como o modelo matemático apenas trabalha com distância percorrida, deve-se indexar estes custos à distância e não ao tempo. Assim, deve-se indexar o custo do equipamento de movimentação em distância, que segue:

$$Coh = \left(\frac{Ceq}{d} + Coe \right) / (tmd \times vmdh \times Te) \quad (69)$$

Onde:

- d : depreciação em meses para o equipamento adquirido;
- Ceq : custo do equipamento de movimentação;
- tmd : tempo máximo disponível para operação no mês;
- $vmdh$: velocidade média de deslocamento horizontal;

- Te : taxa de eficiência do equipamento de movimentação.
- Coe : Custo de operação mensal do equipamento de movimentação, incluindo mão de obra e consumíveis do equipamento.

Por sua vez, o custo do equipamento para o deslocamento vertical será de:

$$Cov = \left(\frac{Ceq}{d} + Coe \right) / (tmd \times vmdv \times Te) \quad (70)$$

Onde:

- $vmdv$: velocidade média de deslocamento na vertical.

Neste caso, a restrição de capacidade do equipamento de movimentação não é considerada, pois o custo está indexado no deslocamento e não no tempo. Obviamente em um cenário onde se tenha excesso de movimentação, mais de um equipamento são necessários.

Para o custo de construção inicial do armazém, devem-se considerar as equações 71 e 72 e aplicá-la tanto na horizontal quanto na vertical. Portanto:

$$CC_h = CP_h + CT + CA_h \quad (71)$$

$$CC_v = CP_v + CA_v \quad (72)$$

Assim, pode-se afirmar que o custo de construção inicial do armazém depende da área existente no plano horizontal e da altura relacionada. Obviamente, para a altura não incide o custo do terreno. Assim, para o custo de construção do prédio, tem-se que:

$$Cph_{ij} = Cca \times Ecs_{ij} \quad (73)$$

Onde:

- Cca : Custo por m^2 de área construída;
- Ecs_{ij} : espaço em m^2 para cada conjunto e seu corredor de *picking* para qualquer posição horizontal (i, j);

O cálculo do espaço horizontal de cada sistema é o mesmo, somente será alterado quando houver mudanças na largura do sistema e ou dos equipamentos de movimentação, portanto a seguinte formulação é necessária:

$$Ecs = \left(Pca + \frac{Lcp}{2} \right) \times Lc \quad (74)$$

Onde:

- *Pca*: Profundidade do conjunto de armazenagem;
- *Lcp*: Largura do corredor de *picking*;
- *Lc*: Largura do conjunto.

Por sua vez, o custo da construção na vertical considera o custo adicional para construir níveis *k* no armazém.

$$Cpv_k = Ccn \times Ecs_{ij} \quad (75)$$

Onde:

- *Cpv*: Custo em m² de construção vertical adicional considerando elevação do prédio devido à altura *k*;
- *Ccn*: Custo adicional de construção ao elevar o prédio do nível *k* para o nível *k+1*.

Por sua vez, o custo do terreno impacta diretamente quando o sistema é mais horizontalizado do que verticalizado. Sendo assim, verifica-se que este custo incide apenas no custeio horizontal, sendo nulo para o vertical. Para encontrar estes valores, aplica-se a seguinte formula:

$$CT = Ctm \times Ecs_{ij} \quad (76)$$

Onde:

- *Ctm*: Custo do terreno por m²;
- *Ecs_{ij}*: espaço em m² para cada conjunto e seu sistema para qualquer posição horizontal (*i, j*);

Os custos relativos à aquisição do sistema de armazenagem são relacionados à operação e neste caso, o mesmo é relacionado a um custo para posições na horizontal e um custo incremental em situações de o sistema possuir níveis verticais. Assim, para o custo do sistema na posição horizontal tem-se:

$$Cah = Cmsa \quad (77)$$

Onde:

- *Cah*: Custo do sistema de armazenagem horizontal;
- *Cmsa*: Custo do conjunto de armazenagem considerando sua respectiva capacidade.

Para o sistema vertical, tem-se o custo do módulo mais o incremento de custo para reforçar a estrutura e suportar níveis acima do solo, então:

$$Cav_k = Cah + Cmsv \quad (78)$$

Onde:

- *Cah*: Custo do sistema de armazenagem horizontal;
- *Cmsv*: incremento de custo para cada nível vertical adicionado;

As fórmulas de custos e de movimentação serão aplicadas em planilhas do *Microsoft Excel* para elaboração dos custos a cada variável a ser analisada. Já o modelo proposto será aplicado em *software* de otimização, neste caso o AIMMS.

Através do levantamento dos parâmetros necessários e a definição das simulações a serem realizadas, pode-se utilizar o modelo proposto para encontrar os resultados necessários para tornar o modelo válido.

4 DIMENSIONAMENTO DE ARMAZÉNS COM ESTRUTURAS PORTA PALETES

4.1 CONSIDERAÇÕES INICIAIS

O modelo proposto inicialmente foi desenvolvido para suportar a aplicação em estruturas do tipo porta paletes convencional ou de dupla profundidade. Entretanto, a aplicação do modelo será analisada apenas para sistemas de porta paletes convencional. Serão realizadas simulações variadas considerando as alterações de algumas variáveis com o objetivo de validar uma análise de sensibilidade relativa ao modelo.

Os dados relativos a custos do terreno foram obtidos através de orçamentos realizados com três imobiliárias no Paraná, sendo em Curitiba, Londrina e Maringá. O apêndice F apresenta o formulário enviado a cada imobiliária para o levantamento dos parâmetros. Deve-se considerar que para efeito da simulação, os custos do terreno serão alterados para validar a aplicabilidade do modelo, conforme será visto mais adiante.

Os custos das estruturas, bem como suas dimensões foram levantados com dois fornecedores nacionais, sendo que o apêndice G apresenta o formulário enviado a estes para levantamento dos parâmetros.

Já os custos de construção foram analisados através de orçamentos realizados para fornecimento destes em Curitiba, Londrina e Maringá no Paraná. Obviamente uma média dos custos destes orçamentos será utilizada para aplicar no modelo. O apêndice H apresenta o formulário enviado às empresas para o levantamento destes dados.

Dados relativos ao desempenho operacional dos equipamentos e movimentação foram obtidos com duas empresas de grande porte na área de logística que utilizam tais equipamentos. Neste caso, também serão utilizadas as médias relativas do desempenho operacional demonstrado por estes. O apêndice I apresenta o formulário enviado a cada empresa para levantamento dos parâmetros de operação.

Por questões de sigilo empresarial, os nomes dos fornecedores e empresa foram retirados do trabalho.

Para encontrar os coeficientes de custos relativos à operação e a construção que farão parte da função objetivo do problema, são utilizadas planilhas do *Microsoft Excel*.

A simulação dos cenários com a otimização matemática utilizará o software de modelagem AIMMS. Estas simulações serão realizadas variando o tipo de equipamento de movimentação para uma mesma quantidade de posições paletes, posteriormente estas simulações serão realizadas variando a quantidade de posições paletes necessárias para o armazém, conforme tabela 5.

Tabela 5 Quantidade de posições paleta a serem simuladas

Simulação Nº	Quantidade de Posições Paletes
1	600
2	1.500
3	3.000
4	6.000
5	9.000

Finalizando a simulação, conforme serão demonstradas posteriormente, variações no custo do terreno serão aplicadas para avaliar a influência deste na verticalização e ou horizontalização das estruturas. Estas variações serão aplicadas acrescentando e diminuindo 25 e 50% do valor do terreno considerado.

4.2 LEVANTAMENTO DAS DIMENSÕES DAS ESTRUTURAS DE ARMAZENAGEM

Para iniciar a programação do modelo é necessário determinar as dimensões das estruturas de armazenagem. Para isso, devem-se definir as dimensões básicas do paleta a ser utilizado. Na simulação do modelo proposto, as dimensões básicas do paleta são:

- Largura do paleta, $Lp = 1,20\text{ m}$;
- Profundidade do paleta, $Pp = 1,00\text{ m}$;
- Altura do paleta, $Ap = 0,15\text{ m}$;
- Peso do Paleta, $P = 1.500\text{ kg}$;
- Altura máxima da carga, $Ac = 1,5\text{ m}$.

Uma vez definida a dimensão do paleta, pode-se definir a dimensão de um conjunto de armazenagem. Nesta simulação serão utilizados conjuntos de armazenagem com 3 paletes sobre suas longarinas. Para tanto, as dimensões da longarina e das colunas de sustentação foram obtidos com dois fornecedores distintos, respeitando-

se as características detalhadas dos paletes, que podem ser analisadas na tabela 6.

Tabela 6 Dimensões dos componentes das estruturas de armazenagem

Dimensões (metros)	Largura da Coluna da Estrutura (Lcl)	Comprimento máximo da Longarina	Altura da Longarina (Al)	Altura máxima da Carga (Ac)
Fornecedor A	0,162	4,50	0,074	1,50
Fornecedor B	0,158	4,50	0,076	1,50
Média	0,160	4,50	0,075	1,50

A dimensão do comprimento máximo da longarina deve ser respeitada, visto que é um pré-requisito do projeto estrutural, para paletes até 1.500 kg que está sendo analisado nesta simulação.

Outro fator levantado com fornecedores foram às folgas necessárias para acondicionar os paletes nas longarinas. Como podem ser observadas na tabela 7, estas variam de acordo com a altura da estrutura de armazenagem.

Tabela 7 Folgas necessárias para acondicionamento do paleta.

Altura da estrutura (metros)	Folga entre paletes (fp)	Folga entre paleta e longarina (fa)	Folga na profundidade do paleta (fc)
$0 \leq He \leq 3$	0,075	0,075	0,05
$3 < He \leq 6$	0,1	0,1	0,05
$6 < He \leq 9$	0,1	0,125	0,05
$9 < He \leq 12$	0,125	0,15	0,05

Avaliando as estruturas de armazenagem duas variáveis são afetadas pelos equipamentos de movimentação e que alteram as dimensões das estruturas. A primeira é a altura que o equipamento de movimentação consegue alcançar e a segunda refere-se à largura necessária do corredor de passagem para que o equipamento possa realizar as manobras de carga e descarga na estrutura de armazenagem. A tabela 8 apresenta estas características de dois fornecedores consultados.

Através destas informações é possível calcular as medidas básicas de um conjunto de armazenagem e seu corredor de passagem, que servirão de base para que o modelo possa calcular as distâncias percorridas, bem como a dimensão do armazém.

Tabela 8 Dimensões relativas a cada equipamento de movimentação

Característica (metros) / Equipamento	Fornecedor C		Fornecedor D		Média	
	Largura mínima do corredor	Altura máxima de elevação	Largura mínima do corredor	Altura máxima de elevação	Largura mínima do corredor	Altura máxima de elevação
Stacker	2,3	5,2	2,4	5,5	2,4	5,4
Empilhadeira a combustão	3,5	6,0	3,5	6,0	3,5	6,0
Empilhadeira elétrica	3,2	7,0	3,2	6,5	3,2	6,8
Empilhadeira Retrátil	2,6	11,0	2,4	10,0	2,5	10,5
Empilhadeira Bilateral	1,4	12,5	1,4	12,5	1,4	12,5
Empilhadeira Trilateral	1,7	12,5	1,7	12,5	1,7	12,5

A primeira medida a ser calculada é a largura entre os conjuntos de armazenagem (*Lec*), que é obtida pela equação 50, e um exemplo do cálculo para o *stacker* pode ser visto na equação 79.

$$Lec = Lcp + n \times Pca = 2,35 + 1 \times 1,05 = 4,45m \quad (79)$$

Onde:

- $Lcp = 2,35$;
- $n = 2$;
- $Pca = 1,05$.

Como estas medidas são alteradas pelas folgas existentes, bem como pelas medidas necessárias para manobra de cada equipamento de movimentação, deve-se calcular estas para cada tipo de equipamento, conforme tabela 9.

Tabela 9 Largura entre corredores para cada equipamento

Parâmetros (metros)/ Equipamento	Largura do corredor de Passagem (<i>Lcp</i>)	Folga na profundidade do palete (<i>fc</i>)	Profundidade do palete (<i>Pp</i>)	Tipo de Sistema de Armazenagem (<i>n</i>)	Profundidade do conjunto de armazenagem (<i>Pca</i>)	Largura entre Corredores (<i>Lec</i>)
Stacker	2,35	0,05	1	2	1,05	4,45
Empilhadeira a combustão	3,50	0,05	1	2	1,05	5,60
Empilhadeira elétrica	3,20	0,05	1	2	1,05	5,30
Empilhadeira Retrátil	2,50	0,05	1	2	1,05	4,60
Empilhadeira Bilateral	1,40	0,05	1	2	1,05	3,50
Empilhadeira Trilateral	1,70	0,05	1	2	1,05	3,80

Observando-se a tabela 9, pode-se analisar que a profundidade do conjunto de armazenagem (*Pca*) é a soma da profundidade do palete com a sua respectiva folga (*fc*), que neste caso é igual para todos os equipamentos ($Pca = 1,05 m$).

Outro parâmetro a ser calculado para que possa se analisar as distâncias percorridas é a largura do conjunto de armazenagem. Este pode ser obtido através da equação 51 e o método de cálculo para o *stacker* pode ser visto na equação 80.

$$Lc = ((2 \times Lcl) + ((np + 1) \times fp) + (Lp \times np)). \therefore$$

$$Lc = ((2 \times 0,16) + ((3 + 1) \times 0,1) + (1,2 \times 3)) = 4,32m \quad (80)$$

Neste caso também é necessário calcular para cada equipamento de movimentação, visto que suas respectivas folgas são diferentes para cada sistema, conforme tabela 10.

Tabela 10 Largura do conjunto de armazenagem para cada tipo de equipamento de movimentação

Parâmetros (metros)/ Equipamento	Altura máxima de elevação	Folga entre paletes (<i>fp</i>)	Largura da Coluna da Estrutura (<i>Lcl</i>)	Número de paletes no conjunto (<i>np</i>)	Largura do palete (<i>Lp</i>)	Largura do Conjunto de Armazenagem (<i>Lc</i>)
Stacker	5,35	0,100	0,16	3	1,2	4,32
Empilhadeira a combustão	6,00	0,100	0,16	3	1,2	4,32
Empilhadeira elétrica	6,75	0,100	0,16	3	1,2	4,32
Empilhadeira Retrátil	10,50	0,125	0,16	3	1,2	4,42
Empilhadeira Bilateral	12,50	0,125	0,16	3	1,2	4,42
Empilhadeira Trilateral	12,50	0,125	0,16	3	1,2	4,42

Um fator determinante neste cálculo é a largura da coluna da estrutura. Para cada largura desta coluna, altera-se a capacidade de sustentação de carga do projeto, sendo assim, este modelo limitou o peso a ser simulado, limitando a cargas até 1.500 kg.

Outra dimensão utilizada para calcular as distâncias percorridas é a altura entre níveis, que determinará a distância percorrida na vertical pelo equipamento de movimentação. Esta medida é encontrada através da equação 54 e o cálculo para o *stacker* pode ser observado na equação 81.

$$He = Ap + Ac + fa + Al = 1,65 + 0,1 + 0,075 = 1,825m \quad (81)$$

Consequentemente, cada equipamento tem a altura entre níveis com uma diferenciação devido às folgas necessárias para cada equipamento, sendo possível observar os resultados para os demais equipamentos na tabela 11.

Tabela 11 Altura entre níveis para cada equipamento de movimentação

Parâmetros (metros)/ Equipamento	Altura máxima de elevação	Folga entre palete e longarina (<i>fa</i>)	Altura do Palete e da Carga, (<i>Ap+Ac</i>)	Altura da Longarina (<i>Al</i>)	Altura entre níveis (<i>He</i>)
Stacker	5,35	0,100	1,65	0,075	1,825
Empilhadeira a combustão	6,00	0,100	1,65	0,075	1,825
Empilhadeira elétrica	6,75	0,125	1,65	0,075	1,850
Empilhadeira Retrátil	10,50	0,125	1,65	0,075	1,850
Empilhadeira Bilateral	12,50	0,150	1,65	0,075	1,875
Empilhadeira Trilateral	12,50	0,150	1,65	0,075	1,875

Outra medida importante a ser calculada é a distância entre dois conjuntos de armazenagem separados por um corredor de passagem (*Dccp*), pois esta é utilizada para calcular a quantidade de variáveis da função objetivo, e é calculada através da equação 58. Na equação 82 pode ser visto o cálculo para o *stacker*.

$$Dccp = Pca \cdot n + Lcp = 1,05 \cdot 2 + 2,35 = 4,45m \quad (82)$$

A tabela 12 apresenta este cálculo para cada equipamento de movimentação, pois cada um necessita de um determinado tamanho de corredor para movimentação.

Tabela 12 Distância entre dois conjuntos de armazenagem separados pelo corredor de passagem (*Dccp*)

Parâmetros (metros)/ Equipamento	Largura do corredor de Passagem (<i>Lcp</i>)	Folga na profundidade do palete (<i>fe</i>)	Profundidade do palete (<i>Pp</i>)	Tipo de Sistema de Armazenagem (<i>n</i>)	Profundidade do conjunto de armazenagem (<i>Pca</i>)	Distância entre dois conjuntos de armazenagem (<i>Dccp</i>)
Stacker	2,35	0,05	1	2	1,05	4,45
Empilhadeira a combustão	3,50	0,05	1	2	1,05	5,60
Empilhadeira elétrica	3,20	0,05	1	2	1,05	5,30
Empilhadeira Retrátil	2,50	0,05	1	2	1,05	4,60
Empilhadeira Bilateral	1,40	0,05	1	2	1,05	3,50
Empilhadeira Trilateral	1,70	0,05	1	2	1,05	3,80

Através das tabelas 9 e 12, pode ser notado que a largura entre corredores (*Lec*) é igual à distância entre dois conjuntos de armazenagem e seu respectivo corredor de passagem (*Dccp*).

Existem mais duas medidas importantes que são utilizadas para calcular as distâncias percorridas e consequentemente as dimensões do armazém. A primeira delas é a distância percorrida da porta de entrada do armazém até o primeiro corredor de passagem das estruturas (*a*), que é calculado conforme equação 52. A equação 83 apresenta um exemplo de cálculo para o *stacker*.

$$a = Pca \times n + \frac{Lcp}{2} = 1,05 \times 1 + \frac{2,35}{2} = 2,23m \quad (83)$$

Como a largura do corredor de passagem é diferente para cada equipamento de movimentação, deve-se então contabilizar individualmente cada medida, conforme tabela 13.

Tabela 13 Distância inicial percorrida na porta de entrada até o primeiro corredor de passagem (*a*)

Parâmetros (metros)/ Equipamento	Largura do corredor de Passagem (<i>Lcp</i>)	Profundidade do conjunto de armazenagem (<i>Pca</i>)	Tipo de sistema de armazenagem (<i>n</i>)	Distância inicial no armazém (<i>a</i>)
Stacker	2,35	1,05	1	2,23
Empilhadeira a combustão	3,50	1,05	1	2,80
Empilhadeira elétrica	3,20	1,05	1	2,65
Empilhadeira Retrátil	2,50	1,05	1	2,30
Empilhadeira Bilateral	1,40	1,05	1	1,75
Empilhadeira Trilateral	1,70	1,05	1	1,90

A segunda medida é referente ao espaço horizontal ocupado por cada conjunto de armazenagem e seu respectivo corredor de passagem (*Ecs*), que é dado pela fórmula 74. A equação 84 apresenta o cálculo para o *stacker*.

$$Ecs = \left(Pca + \frac{Lcp}{2} \right) \times Lc = \left(1,05 + \frac{2,35}{2} \right) \times 4,32 = 6,13m^2 \quad (84)$$

Por outro lado, o espaço ocupado por um conjunto de armazenagem varia de acordo com o equipamento de movimentação utilizado, e seus resultados podem ser encontrados na tabela 14.

Tabela 14 Espaço horizontal ocupado pelo conjunto de armazenagem e seu respectivo corredor

Parâmetros (metros)/ Equipamento	Largura do corredor de Passagem (<i>Lcp</i>)	Profundidade do conjunto de armazenagem (<i>Pca</i>)	Largura do Conjunto de Armazenagem (<i>Lc</i>)	Espaço horizontal ocupado por cada conjunto de armazenagem em m^2 (<i>Ecs</i>)
Stacker	2,35	1,05	4,32	6,13
Empilhadeira a combustão	3,50	1,05	4,32	8,61
Empilhadeira elétrica	3,20	1,05	4,32	7,96
Empilhadeira Retrátil	2,50	1,05	4,42	6,58
Empilhadeira Bilateral	1,40	1,05	4,42	4,14
Empilhadeira Trilateral	1,70	1,05	4,42	4,81

A partir das medidas encontradas é possível calcular as distâncias horizontais e verticais a serem percorridas pelos equipamentos de movimentação, bem como o espaço necessário para construir o armazém.

4.3 LEVANTAMENTO DAS VELOCIDADES DOS EQUIPAMENTOS DE MOVIMENTAÇÃO

Os equipamentos de movimentação possuem velocidades de operação no sentido horizontal e vertical. Foram levantados com dois fabricantes os tempos de deslocamento nos dois sentidos, que podem ser na horizontal e na vertical, conforme tabela 15.

Tabela 15 Parâmetros de Velocidade dos Equipamentos de Movimentação

Parâmetros/ Equipamento	Fornecedor C		Fornecedor D		Média	
	Velocidade máxima de deslocamento (Vmdh) - Km/h	Velocidade máxima de elevação (Vmdv) - m/s	Velocidade máxima de deslocamento (Vmdh) - Km/h	Velocidade máxima de elevação (Vmdv) - m/s	Velocidade máxima de deslocamento (Vmdh) - Km/h	Velocidade máxima de elevação (Vmdv) - m/s
Stacker	4,9	0,11	5,1	0,12	5,00	0,12
Empilhadeira a combustão	18,9	0,35	20,9	0,38	19,90	0,37
Empilhadeira elétrica	18,9	0,35	15,7	0,38	17,30	0,37
Empilhadeira Retrátil	11	0,35	12	0,38	11,50	0,37
Empilhadeira Bilateral	11	0,35	12	0,38	11,50	0,37
Empilhadeira Trilateral	11	0,35	12	0,38	11,50	0,37

Outro fator determinante nos cálculos da distância percorrida é a taxa de eficiência destes equipamentos. A taxa de eficiência é calculada através da diferença das distâncias teóricas possíveis percorridas pelo equipamento e as distâncias reais encontradas no dia a dia. Existem muitos fatores que podem aumentar ou diminuir esta eficiência, como por exemplo: manutenção do equipamento, falha do equipamento, inabilidade do operador, espera de informação entre outras. Como não é o foco do presente trabalho o detalhamento destas eficiências, foram consultadas algumas empresas que trabalham com tais equipamentos para avaliar a sua performance e com isso calcular a taxa de eficiência. A tabela 16 apresenta os resultados de velocidade média tanto na horizontal como na vertical obtidos consultando duas empresas.

Tabela 16 Velocidade média dos equipamentos em duas empresas consultadas

Parâmetros/ Equipamento	Empresa A		Empresa B		Média	
	Velocidade média de deslocamento (Vmdh) - Km/h	Velocidade média de elevação (Vmdv) - m/s	Velocidade média de deslocamento (Vmdh) - Km/h	Velocidade média de elevação (Vmdv) - m/s	Velocidade média de deslocamento (Vmdh) - Km/h	Velocidade média de elevação (Vmdv) - m/s
Stacker	0,740	0,006	0,743	0,008	0,742	0,007
Empilhadeira a combustão	4,366	0,027	5,472	0,031	4,919	0,029
Empilhadeira elétrica	3,747	0,033	3,246	0,034	3,496	0,033
Empilhadeira Retrátil	2,024	0,032	2,301	0,033	2,163	0,033
Empilhadeira Bilateral	2,101	0,033	2,363	0,038	2,232	0,036
Empilhadeira Trilateral	1,870	0,034	2,048	0,033	1,959	0,033

A partir das velocidades médias de operação obtidas nas empresas consultadas, pode-se calcular a taxa de eficiência para cada equipamento, demonstrado na tabela 17. Esta taxa de eficiência é obtida pela razão entre a velocidade média real encontrada nas empresas consultadas (conforme tabela 16) e a velocidade máxima de operação obtida com os fornecedores (tabela 15).

Tabela 17 Taxa de eficiência dos equipamentos de movimentação obtidos em duas empresas consultadas

Eficiência (%)/ Equipamento	Empresa A		Empresa B		Média	
	Eficiência do Deslocamento	Eficiência de Elevação	Eficiência do Deslocamento	Eficiência de Elevação	Eficiência do Deslocamento	Eficiência de Elevação
Stacker	15,1%	5,9%	14,6%	6,7%	14,8%	6,3%
Empilhadeira a combustão	23,1%	7,8%	26,2%	8,2%	24,6%	8,0%
Empilhadeira elétrica	19,8%	9,3%	20,7%	8,9%	20,2%	9,1%
Empilhadeira Retráteis	18,4%	9,1%	19,2%	8,7%	18,8%	8,9%
Empilhadeira Bilateral	19,1%	9,6%	19,7%	9,9%	19,4%	9,7%
Empilhadeira Trilateral	17,0%	9,6%	17,1%	8,8%	17,0%	9,2%

4.4 LEVANTAMENTO DOS CUSTOS ENVOLVIDOS

O primeiro índice de custo levantado foi o custo do terreno em metros quadrados. Para este levantamento, três imobiliárias foram consultadas nas três maiores cidades do Paraná, com o objetivo de realizar uma média destes custos e encontrar um valor alvo para a simulação. Esta média deve-se pelo fato de que o preço do terreno pode variar muito de uma cidade para outra ou até mesmo dentro da própria cidade, devido a questões de localização, infraestrutura, entre outros. A tabela 18 apresenta os valores encontrados e o valor alvo que será utilizado na simulação.

Tabela 18 Custo médio do terreno por metro quadrado

Parâmetros/ Fornecedor		Área (m ²)	Valor (R\$)	R\$/m ²
Curitiba	Imobiliária A	47.000	23.000.000	489,36
	Imobiliária B	40.000	10.000.000	250,00
	Imobiliária C	22.000	5.800.000	263,64
Londrina	Imobiliária A	18.700	7.000.000	374,33
	Imobiliária B	11.000	3.800.000	345,45
	Imobiliária C	6.000	1.450.000	241,67
Maringá	Imobiliária A	4.500	1.350.000	300,00
	Imobiliária B	7.130	2.850.000	399,72
	Imobiliária C	1.400	560.000	400,00
Média	Imobiliária A	23.400	10.450.000	446,58
	Imobiliária B	19.377	5.550.000	286,43
	Imobiliária C	9.800	2.603.333	265,65
Total		52.577	18.603.333	353,83

Uma vez encontrado o valor alvo para o terreno, pode ser realizada o acréscimo e decréscimo deste valor para realizar a simulação em vários cenários de custo de terreno, conforme explicado no item 4.1. Assim, a tabela 19 demonstra as variações de custo de terreno que serão simuladas.

Tabela 19 Variação no custo do terreno para simulação

Custo do Terreno					
%	-50	-25	0	25	50
R\$/m ²	176,92	265,37	353,83	442,29	530,75

Para o custo de construção do barracão industrial a mesma lógica do custo do terreno foi utilizada. Entretanto, para fins de limitação do trabalho algumas circunstancias não foram consideradas neste levantamento de custo que devem ser levados em conta na determinação dos preços por metro quadrado de construção, de acordo com o estabelecido no projeto e especificações correspondentes a cada caso particular, como por exemplo:

- submuramentos, paredes-diafragma e tirantes;
- rebaixamento de lençol freático;
- elevador(es);

- equipamentos e instalações, tais como: fogões, aquecedores, bombas de recalque, incineração, ar-condicionado, calefação, ventilação e exaustão, outros;
- obras e serviços complementares, tais como: sistema de combate a incêndio, sistemas de segurança, sistema de ventilação, entre outros;
- impostos, taxas e emolumentos cartoriais;
- projetos: projetos arquitetônicos, projeto estrutural, projeto de instalação, projetos especiais;
- remuneração do construtor; remuneração do incorporador.

Assim estes custos avaliados limitam-se apenas a validar os custos relativos à construção do armazém propriamente dito, conforme demonstra a tabela 20.

Tabela 20 Custo de construção por metro quadrado nas empresas pesquisadas

Parâmetros/ Fornecedor	Curitiba		Londrina		Maringá		Média Final
	Fornecedor E	Fornecedor F	Fornecedor E	Fornecedor F	Fornecedor E	Fornecedor F	
Custo em m ² da área construída (Cca)	R\$ 1.250,41	R\$ 1.295,67	R\$ 1.269,47	R\$ 1.255,18	R\$ 1.317,10	R\$ 1.301,62	R\$ 1.281,57
Custo adicional em m para elevar o prédio (Ccn)	R\$ 875,29	R\$ 906,97	R\$ 888,63	R\$ 878,62	R\$ 921,97	R\$ 911,13	R\$ 897,10

Já para os equipamentos de armazenagem, neste caso, como são estruturas metálicas moduláveis, é possível calcular o custo por conjunto de armazenagem e um incremento de custo para a elevação de níveis. Neste caso, como existem diferenças de medidas para cada equipamento de movimentação, os custos também se alteram.

São dois padrões de medida que se alteram: para o *Stacker*, Empilhadeira a combustão e Empilhadeira elétrica a largura do conjunto de armazenagem é 4,32 metros (padrão 1) e para a Empilhadeira Retrátil, Empilhadeira Bilateral e Empilhadeira Trilateral a largura do conjunto de armazenagem é 4,42 metros (padrão 2). Outro fator considerado é que para estas medidas do conjunto de armazenagem foram consideradas a utilização de 3 posições paletes por conjunto. Foram duas empresas consultadas e seus respectivos valores podem ser analisados na tabela 21.

Tabela 21 Custos do conjunto de armazenagem e custos adicionais de elevação

Parâmetros (metros)/ Equipamento	Custo do conjunto de armazenagem (R\$/conjunto)		Custo adicional para elevar o nível do conjunto (R\$/nível)	
	Padrão 1	Padrão 2	Padrão 1	Padrão 2
Fornecedor A	R\$ 227,70	R\$ 267,30	R\$ 28,25	R\$ 29,65
Fornecedor B	R\$ 264,45	R\$ 291,75	R\$ 25,15	R\$ 27,18
Média	R\$ 246,08	R\$ 279,53	R\$ 26,70	R\$ 28,42

Para os equipamentos de movimentação os custos levantados são referentes ao valor de compra do equipamento, sem considerar custos adicionais de transporte, seguro, treinamento e manutenção que podem vir agregados no momento da compra. A tabela 22 apresenta os custos orçados com dois fornecedores relativos aos tipos de equipamentos.

Tabela 22 Custos de aquisição dos equipamentos de movimentação

Valor (R\$)/ Equipamento	Fornecedor C	Fornecedor D	Média
Stacker	26.000,00	28.000,00	27.000,00
Empilhadeira a combustão	48.000,00	55.000,00	51.500,00
Empilhadeira elétrica	68.000,00	72.000,00	70.000,00
Empilhadeira Retráteis	85.000,00	79.000,00	82.000,00
Empilhadeira Bilateral	89.000,00	92.000,00	90.500,00
Empilhadeira Trilateral	102.000,00	107.000,00	104.500,00

Outro custo utilizado no modelo apresentado é o custo de operação de um equipamento, considerando os consumíveis do equipamento, o combustível, bem como o gasto em manutenção do mesmo. Neste caso, o custo de manutenção e de operação foi realizado considerando que a empilhadeira trabalha em três turnos e 26 dias no mês. Para levantar estes custos os fornecedores realizaram uma média de gastos realizados com seus equipamentos que trabalham nestas condições e os valores podem ser vistos na tabela 23. Além dos parâmetros da tabela, o custo relativo à mão de obra é de R\$ 7.200,00 por mês, considerando o salário de três funcionários (para três turnos de trabalho) com acréscimo de 50% para obrigações sociais.

Tabela 23 Custos de operação do equipamento de movimentação

Valor (R\$)/ Equipamento	Empresa A		Empresa B		Média		Custo de operação do equipamento (R\$/mês)
	Custo Combustível (R\$/mês)	Custo de Manutenção (R\$/mês)	Custo Combustível (R\$/mês)	Custo de Manutenção (R\$/mês)	Custo Combustível (R\$/mês)	Custo de Manutenção (R\$/mês)	Custo de combustível + Custo de Manutenção + Custo do Operador
Stacker	620,00	100,00	580,00	75,00	600,00	87,50	7.887,50
Empilhadeira a combustão	1.848,00	600,00	1.632,00	500,00	1.740,00	550,00	9.490,00
Empilhadeira elétrica	810,00	150,00	850,00	150,00	830,00	150,00	8.180,00
Empilhadeira Retrátil	950,00	250,00	900,00	200,00	925,00	225,00	8.350,00
Empilhadeira Bilateral	980,00	300,00	950,00	250,00	965,00	275,00	8.440,00
Empilhadeira Trilateral	980,00	300,00	950,00	250,00	965,00	275,00	8.440,00

Os custos envolvidos desta etapa foram levantados através de contato telefônico e email, o que torna difícil validar se os mesmos são reais. Assim, é de se esperar que para cada operação se tenham custos diferentes relativos na implantação de um armazém. Entretanto, os apêndices F a I apresentam os formulários utilizados para cada fornecedor para levantamento destes parâmetros.

4.5 ATRIBUIÇÃO DO NÚMERO DE VARIÁVEIS

Conforme demonstra a tabela 5 serão realizadas 5 simulações para cada equipamento de movimentação, variando a quantidade de posições paletes que alteram a quantidade de variáveis do problema. Para tanto, o modelo converte estas posições paletes em conjuntos de armazenagem, conforme equação 55. A equação 85 apresenta o cálculo para 600 posições paletes.

$$C = \frac{Q}{np} = \frac{600}{3} = 200 \quad (85)$$

Pode-se observar na tabela 24 o número de conjuntos para cada simulação e verifica-se que a quantidade de conjuntos teve seu valor arredondado por ser uma unidade discreta.

O próximo passo é atribuir o número de variáveis do modelo. Neste cenário, o modelo cria uma variável para cada conjunto de armazenagem, sem considerar inicialmente a elevação em níveis. Entretanto, por questões de proporcionalidade, os índices horizontais (*i* e *j*) apesar de assumirem os valores máximos de conjuntos, estes não seriam utilizados pelo modelo.

Tabela 24 Quantidade de conjuntos de armazenagem a serem simulados

Simulação Nº	Quantidade de Posições Paletes	Quantidade de Conjuntos de armazenagem contendo 3 posições paletes
1	600	200
2	1.500	500
3	3.000	1.000
4	6.000	2.000
5	9.000	3.000

Para tanto, é necessário realizar a proporcionalidade entre a largura de um conjunto de armazenagem (L_c) e a distância entre dois conjuntos de armazenagem e seu respectivo corredor de passagem (D_{ccp}), utilizando-se para isto das equações 56 e 57. Esta proporcionalidade é necessária, como já foi dito, para limitar as variáveis no plano horizontal (índices i e j) que não serão consideradas durante a simulação. As equações 86 e 87 apresentam o cálculo desta proporcionalidade para a simulação número 1 considerando o *stacker*. Os valores das variáveis da equação são obtidos nas tabelas 10 e 12.

$$I = \frac{\sqrt{C \cdot L_c \cdot D_{ccp}}}{D_{ccp}} = \frac{\sqrt{200 \cdot 4,32 \cdot 4,45}}{4,45} = 13,93 \quad (86)$$

$$J = \frac{\sqrt{C \cdot L_c \cdot D_{ccp}}}{L_c} = \frac{\sqrt{200 \cdot 4,32 \cdot 4,45}}{4,32} = 14,35 \quad (87)$$

Nesta análise, deve-se considerar que cada equipamento de movimentação possui uma largura de corredor distinto, o que altera a proporcionalidade entre as duas medidas. A tabela 25 apresenta esta proporcionalidade para cada um dos equipamentos de movimentação.

Ao se analisar a tabela 25, pode-se identificar uma pequena variação para os índices I e J para os diferentes equipamentos de movimentação e em uma mesma simulação.

Tabela 25 Limitação dos índices I e J das variáveis pela proporcionalidade

Simulação No		1	2	3	4	5
Quantidade de Conjuntos		200	500	1000	2000	3000
Stacker	I	13,93	22,03	31,16	44,06	53,97
	J	14,35	22,69	32,10	45,39	55,59
Empilhadeira a combustão	I	12,42	19,64	27,77	39,28	48,11
	J	16,10	25,46	36,00	50,92	62,36
Empilhadeira elétrica	I	12,77	20,19	28,55	40,38	49,45
	J	15,66	24,77	35,03	49,53	60,67
Empilhadeira Retrátil	I	13,86	21,92	31,00	43,84	53,69
	J	14,43	22,81	32,26	45,62	55,88
Empilhadeira Bilateral	I	15,89	25,13	35,54	50,26	61,55
	J	12,58	19,90	28,14	39,80	48,74
Empilhadeira Trilateral	I	15,25	24,12	34,11	48,23	59,07
	J	13,11	20,73	29,32	41,47	50,79

Assim, por questões de facilidade de leitura, bem como para facilitar os cálculos, assume-se um valor para *I* e *J* para cada simulação, indiferente do equipamento utilizado. Este valor a ser assumido é o maior valor encontrado para os diferentes equipamentos em uma mesma simulação. A tabela 26 demonstra esta simplificação, considerando os arredondamentos necessários.

Tabela 26 Valores máximos a serem considerados pelos índices I e J da variável de decisão

Simulação N°	Quantidade de Conjuntos de armazenagem contendo 3 posições paletes	Índice I	Índice J
1	200	17	17
2	500	26	26
3	1.500	36	36
4	2.000	51	51
5	3.000	63	63

Uma vez encontrada a limitação da quantidade dos índices *I* e *J* da variável de decisão, faz-se necessário encontrar os limitantes do índice *K* que é relativo à altura do armazém. Neste caso, o que limita este índice é a capacidade de elevação dos equipamentos de movimentação. Assim sendo, a conversão desta capacidade dos equipamentos de metros para níveis de armazenagem, se faz necessária, conforme pode ser visto na tabela 27.

Tabela 27 Alcance máximo em altura relativo ao nível de armazenagem pelo equipamento de movimentação

Equipamento	Altura máxima de elevação	Altura entre níveis (He)	Nível máximo alcançado pelo equipamento (Nm)	Nível máximo inteiro (Nm/He)
Stacker	5,35	1,825	2,93	2
Empilhadeira a combustão	6,00	1,825	3,29	3
Empilhadeira elétrica	6,75	1,850	3,65	3
Empilhadeira Retrátil	10,50	1,850	5,68	5
Empilhadeira Bilateral	12,50	1,875	6,67	6
Empilhadeira Trilateral	12,50	1,875	6,67	6

Neste caso existe uma diferença entre a quantidade de níveis acima do solo e os valores que k pode assumir, pois existe o nível solo, ou seja, sem elevação. Assim, os valores de k serão considerados de I até K , sendo $k = I$ o nível solo, e $k = 2$ igual ao primeiro nível elevado em relação ao solo. Sendo assim, o valor máximo de k para o *stacker* passa a ser $k = 3$.

Uma vez encontrado o limitante de altura por equipamento é possível levantar o número de variáveis envolvidas em cada uma das simulações. Este número de variáveis é calculado mediante a fórmula 59. A equação 88 apresenta o cálculo para o *stacker* na simulação número 1.

$$N_v = I \cdot J \cdot K = 17 \cdot 17 \cdot 3 = 867 \quad (88)$$

Já para os outros modelos, as respectivas quantidades de variáveis a serem introduzidas podem ser vistas na tabela 28. Observa-se que um nível foi adicionado que se refere ao nível solo.

Apesar do número elevado de variáveis do problema na solução através da programação linear inteira, aplicando corretamente os recursos computacionais atuais é perfeitamente factível a solução deste modelo em tempo satisfatório. Outro fator relevante é que serão assumidos para qualquer simulação os índices I e J da simulação número 5, facilitando assim a programação do *software* de simulação.

Tabela 28 Número de variáveis a serem introduzidas no modelo

Número de variáveis por simulação e equipamento	Sim. No	1	2	3	4	5
	Índice <i>I</i>	17	21	36	51	63
	Índice <i>J</i>	17	21	36	51	63
Equipamento	Índice <i>K</i>					
Stacker	3	867	1.323	3.888	7.803	11.907
Empilhadeira a combustão	4	1.156	1.764	5.184	10.404	15.876
Empilhadeira elétrica	4	1.156	1.764	5.184	10.404	15.876
Empilhadeira Retrátil	6	1.734	2.646	7.776	15.606	23.814
Empilhadeira Bilateral	7	2.023	3.087	9.072	18.207	27.783
Empilhadeira Trilateral	7	2.023	3.087	9.072	18.207	27.783

4.6 CÁLCULO DO DESLOCAMENTO DOS EQUIPAMENTOS DE MOVIMENTAÇÃO

Para inserir os custos envolvidos na operação do armazém é necessário indexar os custos de operação pelo deslocamento realizado em um período de tempo. Neste modelo, estes são indexados por um mês de operação.

Inicialmente levantam-se os deslocamentos realizados na posição horizontal ($dh_{i,j}$) que acumula a distância percorrida no eixo x e no eixo y do armazém, que é obtida através da equação 49. Para calcular as distâncias, os parâmetros encontram-se resumidos na tabela 29, sendo aplicado para cada respectivo equipamento.

Tabela 29 Resumo dos parâmetros para cálculo da distância horizontal

Parâmetro (metros)/ Equipamento	Largura entre Corredores (<i>Lec</i>)	Largura do Conjunto de Armazenagem (<i>Lc</i>)	Distância inicial no armazém (<i>a</i>)	Largura do Corredor principal (<i>Cpp</i>)
Stacker	4,45	4,32	2,23	10
Empilhadeira a combustão	5,60	4,32	2,80	10
Empilhadeira elétrica	5,30	4,32	2,65	10
Empilhadeira Retrátéis	4,60	4,42	2,30	10
Empilhadeira Bilateral	3,50	4,42	1,75	10
Empilhadeira Trilateral	3,80	4,42	1,90	10

A equação 89 apresenta o método de cálculo para o deslocamento horizontal do *stacker* até a posição do conjunto $i=1$ e $j=1$.

$$dh_{i,j} = \underbrace{n \times a + Lec \times (ncp - 1)}_{eixo x} + \underbrace{\frac{C_{pp}}{2} + \frac{Lc}{2} + Lc \times (j - 1)}_{eixo y} \quad (89)$$

$$dh_{i,j} = 1 \times 2,23 + 4,45 \times (1 - 1) + \frac{10}{2} + \frac{4,32}{2} + 4,32 \times (1 - 1) = 9,4$$

A matriz das distâncias horizontais percorridas por todos os equipamentos encontram-se no arquivo de planilha eletrônica denominado “Tabelas Distâncias.xlsx” no CD-Dados no Apêndice J.

Por sua vez, a distância percorrida na vertical (dz_k) não é alterada dependendo da posição na horizontal. Sendo assim, as distâncias verticais são iguais para todas as posições que estão em um mesmo nível. Estas podem ser encontradas na tabela 30.

Tabela 30 Distância percorrida na vertical pelo equipamento de movimentação

Distância na Vertical - dz_k (m)		No do Nível (k)						
Parâmetro (metros)/ Equipamento	Altura entre níveis (He)	1	2	3	4	5	6	7
Stacker	1,83	-	1,83	3,65	-	-	-	-
Empilhadeira a combustão	1,83	-	1,83	3,65	5,48	-	-	-
Empilhadeira elétrica	1,85	-	1,85	3,70	5,55	-	-	-
Empilhadeira Retráteis	1,85	-	1,85	3,70	5,55	7,40	9,25	-
Empilhadeira Bilateral	1,88	-	1,88	3,75	5,63	7,50	9,38	11,25
Empilhadeira Trilateral	1,88	-	1,88	3,75	5,63	7,50	9,38	11,25

Uma vez encontrada as distâncias percorridas para cada uma das posições de armazenagem relativa ao seu equipamento de movimentação, o próximo passo é encontrar os custos relativos a estes deslocamentos, tanto na horizontal como na vertical.

4.7 COMPOSIÇÃO DOS CUSTOS DE OPERAÇÃO

Ao encontrar as distâncias para cada posição de armazenagem, tanto na vertical como na horizontal, é possível compor os custos de operação para cada distância, sendo posteriormente incrementado este custo em relação à demanda e ou giro da mercadoria no estoque. A composição deste custo de operação, conforme equação 68 é a soma entre os custos de aquisição e de operação dos equipamentos de movimentação (CO). Neste caso devem-se compor estes custos para a posição horizontal e vertical.

Para compor os custos de movimentação na horizontal, deve-se utilizar a equação 69. A equação 90 apresenta o cálculo do custo de

operação por metro na horizontal. Estes custos devem ser indexados por deslocamento, para tanto, deve-se equalizar os parâmetros nesta unidade de medida, utilizando-se para tanto as seguintes informações:

- depreciação em meses para o equipamento adquirido; $d = 120$ meses;
- tempo máximo disponível para operação no mês; $tmd = 720$ horas.

$$Coh = \left(\frac{Ceq}{d} + Coe \right) / (tmd \times vmdh \times Te) \quad (90)$$

$$Coh = \left(\frac{27.000}{120} + 7.887,50 \right) / (720 \times 5000 \times 0,148) = 0,0151887 \text{ R\$ / m}$$

A tabela 31 apresenta os dados resumidos para os cálculos, bem como o resultado para os demais equipamentos.

Tabela 31 Custo da movimentação horizontal

Valor (R\$)/ Equipamento	Custo de Aquisição (Ceq) - R\$	Custo de operação do equipamento (Coe) - R\$/mês	Taxa de Eficiência (Te)	Velocidade Máxima de Deslocamento ($Vmdh$) - m/h	Custo da movimentação horizontal (Coh) - R\$/m
<i>Stacker</i>	27.000	R\$ 7.887,50	14,8%	5.000,00	0,0151887
Empilhadeira a combustão	51.500	R\$ 9.490,00	24,6%	19.900,00	0,0028096
Empilhadeira elétrica	70.000	R\$ 8.180,00	20,2%	17.300,00	0,0034745
Empilhadeira Retrátil	82.000	R\$ 8.350,00	18,8%	11.500,00	0,0058070
Empilhadeira Bilateral	90.500	R\$ 8.440,00	19,4%	11.500,00	0,0057245
Empilhadeira Trilateral	104.500	R\$ 8.440,00	17,0%	11.500,00	0,0066017

Os custos relativos da operação na vertical (Cov) seguem a mesma lógica dos custos relacionados à horizontal, entretanto considerando a velocidade máxima de deslocamento na vertical ($Vmdv$) e sua respectiva taxa de eficiência. Os demais parâmetros possuem valor igual nos dois casos. Baseado na equação 70 realiza-se estes cálculos para todos os equipamentos. O cálculo para o *stacker* pode ser visto na equação 91.

$$Cov = \left(\frac{Ceq}{d} + Coe \right) / (tmd \times vmdv \times Te) \quad (91)$$

$$Cov = \left(\frac{27.000}{120} + 7.887,50 \right) / (720 \times 414 \times 0,062936) = 0,4324402 \text{ R\$ / m}$$

A tabela 32 apresenta os custos de deslocamento vertical por metro de deslocamento.

Tabela 32 Custo da movimentação vertical

Valor (R\$)/ Equipamento	Custo de Aquisição (C_{eq}) - R\$	Custo de operação do equipamento (C_{oe}) - R\$/mês	Taxa de Eficiência (T_e)	Velocidade Máxima de elevação (V_{mdv}) - m/h	Custo da movimentação vertical (C_{ov}) - R\$/m
<i>Stacker</i>	27.000	R\$ 7.887,50	6,3%	414,00	0,4324402
Empilhadeira a combustão	51.500	R\$ 9.490,00	8,0%	1.314,00	0,1312536
Empilhadeira elétrica	70.000	R\$ 8.180,00	9,1%	1.314,00	0,1020560
Empilhadeira Retrátil	82.000	R\$ 8.350,00	8,9%	1.314,00	0,1069928
Empilhadeira Bilateral	90.500	R\$ 8.440,00	9,7%	1.314,00	0,0997413
Empilhadeira Trilateral	104.500	R\$ 8.440,00	9,2%	1.314,00	0,1071371

O custo da movimentação para cada posição de armazenagem na horizontal ($C_{oh_{ij}}$) é calculada através do produto das distâncias percorridas (arquivo de planilha eletrônica denominado “Tabelas Distâncias.xlsx” no CD-Dados no Apêndice J) e o custo da movimentação na vertical (Tabela 31).

O cálculo dos custos de operação na horizontal são encontrados no arquivo de planilha eletrônica denominado “Tabelas custos deslocamento.xlsx” no CD-Dados no Apêndice J. Ressalta-se que para compor estes custos, foi considerado o dobro da distância percorrida; que é a ida e o retorno do equipamento de movimentação no ponto inicial do armazém. Como não é objetivo do presente trabalho validar questões de alocação e *picking*, então não se considera a possibilidade do equipamento realizar outra tarefa no percurso.

Já os custos da movimentação para os níveis que se encontram acima do solo (C_{ov_k}) são iguais para qualquer posição horizontal dentro do armazém, somente alterando este valor quando há alteração no nível de armazenagem. Da mesma forma que para a horizontal, aqui também se considera o dobro do deslocamento percorrido. Através da tabela 32 compõem-se os custos para deslocamento vertical para cada nível e seus valores são encontrados na tabela 33.

Tabela 33 Custos do deslocamento na vertical

Custo do deslocamento na Vertical - C_{mv_k} (R\$/ Nível)		No do Nível (k)						
Parâmetro (metros)/ Equipamento	Altura entre níveis (H_e)	1	2	3	4	5	6	7
<i>Stacker</i>	1,83	-	1,57841	3,15681	-	-	-	-
Empilhadeira a combustão	1,83	-	0,47908	0,95815	1,43723	-	-	-
Empilhadeira elétrica	1,85	-	0,37761	0,75521	1,13282	-	-	-
Empilhadeira Retrátil	1,85	-	0,39587	0,79175	1,18762	1,58349	1,97937	-
Empilhadeira Bilateral	1,88	-	0,37403	0,74806	1,12209	1,49612	1,87015	2,24418
Empilhadeira Trilateral	1,88	-	0,40176	0,80353	1,20529	1,60706	2,00882	2,41058

Posteriormente estes custos serão adicionados aos custos de construção do prédio para elaboração dos coeficientes de custos para

cada posição de armazenagem e seu respectivo equipamento de movimentação.

4.8 COMPOSIÇÃO DOS CUSTOS DE CONSTRUÇÃO

A composição dos custos de construção é relacionada à somatória dos investimentos em terreno (*CT*), construção do prédio (*CP*) e aquisição das estruturas de armazenagem (*CA*). Como dito anteriormente, apenas os custos de construção do prédio (*CP*) como os custos das estruturas de armazenagem (*CA*) incidem nas posições verticais e horizontais. Os custos relativos ao terreno (*CT*) somente incidem na posição horizontal.

Os custos de construção do prédio devem ser obtidos para cada conjunto de armazenagem em sua posição horizontal e adicionar o acréscimo para contabilizar tais custos nas posições acima do solo (vertical). Assim, através da equação 73 e 75 encontram-se o método de cálculo dos custos de construção. Como este custo de construção está indexado no espaço ocupado por um módulo de armazenagem, estes independem da posição, ou seja, para qualquer posição no solo ou para qualquer posição em um mesmo nível, o custo da construção é o mesmo. As equações 92 e 93 apresentam os cálculos do custo para o conjunto e o incremento para a elevação do prédio para o equipamento *stacker*.

$$Cph_{ij} = Cca \times Ecs_{ij} = 1.287,54 \times 6,126 = R\$ 7.850,90 \quad (92)$$

$$Cpv_k = Ccn \times Ecs_{ij} = 897,10 \times 6,126 = R\$ 5.495,63 \quad (93)$$

A tabela 34 demonstra estes custos de construção para qualquer nível de armazenagem, relacionando seu respectivo equipamento de movimentação. O custo relativo à construção é de R\$ 1.287,54/ m² e o custo adicional é de R\$ 897,10 m² elevado.

O custo relativo ao corredor de passagem principal não será contabilizado visto que este deve existir independente do equipamento de movimentação. Os custos de construção de áreas administrativas e áreas comuns também não serão contabilizados, visto que independente do tipo do projeto, estas devem existir.

Tabela 34 Custos de Construção do Prédio

Custo de Construção do Prédio (CP) - R\$/ Conjunto de Armazenagem	Stacker	Empilhadeira a combustão	Empilhadeira elétrica	Empilhadeira Retráteis	Empilhadeira Bilateral	Empilhadeira Trilateral
Espaço horizontal ocupado por cada conjunto de armazenagem em m2 (<i>Ecs</i>)	6,126	8,610	7,962	6,575	4,144	4,807
Horizontal, <i>h</i>	R\$ 7.850,90	R\$ 11.034,32	R\$ 10.203,86	R\$ 8.426,32	R\$ 5.310,83	R\$ 6.160,51
Vertical, <i>v</i> (Custo adicional)	5.495,63	7.724,02	7.142,70	5.898,43	3.717,58	4.312,35

Por sua vez, o custo do terreno contabiliza o espaço ocupado horizontalmente e pode ser obtido através da equação 76. O custo do terreno por m² contabilizado é de R\$ 353,83 e a equação 94 apresenta o método de cálculo para o *stacker*.

$$CT = Ctm \times Ecs_{ij} = 353,83 \times 6,126 = 2.167,56 \quad (94)$$

Para os demais equipamentos, os custos do terreno por posição horizontal estão demonstrados na tabela 35.

Tabela 35 Custo do terreno para qualquer posição horizontal

Custo do Terreno (CT) - R\$/ Conjunto de Armazenagem	Stacker	Empilhadeira a combustão	Empilhadeira elétrica	Empilhadeira Retráteis	Empilhadeira Bilateral	Empilhadeira Trilateral
Espaço horizontal ocupado por cada conjunto de armazenagem em m2 (<i>Ecs</i>)	6,126	8,610	7,962	6,575	4,144	4,807
Horizontal, <i>h</i>	R\$ 2.167,56	R\$ 3.046,48	R\$ 2.817,19	R\$ 2.326,43	R\$ 1.466,27	R\$ 1.700,86

O próximo componente de custo de construção a ser calculado é o custo com a aquisição das estruturas de armazenagem (CA). Estas estruturas possuem um custo inicial para cada módulo e ao se elevar a estrutura, os módulos possuem um incremento de custo para reforçar esta e suportar o peso acima do nível 1. Independente da quantidade de elevação, se para o nível 2 ou se para os demais níveis, o custo do conjunto de armazenagem possui o mesmo incremento.

Inicialmente encontra-se o custo da estrutura de um conjunto de armazenagem (*Cah*), que pode ser obtido através da equação 77. Como são dois padrões de medida que se alteram é necessário calcular para os dois tipos. A equação 95 apresenta o cálculo para o padrão 1.

$$Cah = Cmsa = R\$ 246,08 \quad (95)$$

A tabela 36 apresentam os custos relativos aos dois padrões das estruturas de armazenagem e seus respectivos equipamentos contemplados.

Tabela 36 Custos da estrutura do conjunto de armazenagem

Parâmetros/ Padrão	Padrão 1	Padrão 2
	- Stacker - Empilhadeira a gás - Empilhadeira elétrica	- Empilhadeira retrátil - Empilhadeira bilateral - Empilhadeira trilateral
Custo do conjunto de armazenagem (R\$/conjunto)	R\$ 246,08	R\$ 279,53

Por sua vez, deve-se contabilizar aos custos destes conjuntos o custo adicional para elevar o nível destas estruturas (Cav_k) que são basicamente reforços na estrutura para suportar os níveis superiores. Assim, os custos da estrutura nos níveis acima do solo possuem um acréscimo para cada nível para garantir a segurança da estrutura. A equação 78 apresenta o método de cálculo dos custos acima do nível do solo e o cálculo para o padrão 1 do conjunto de armazenagem pode ser visto na equação 96.

$$Cav_k = Cah + Cmsv = 246,08 + 26,70 = R\$ 272,78 \quad (96)$$

Os valores relativos ao incremento de custo para elevar um nível da estrutura, bem como o valor total do custo para este conjunto de armazenagem acima do nível do solo pode ser visto na tabela 37.

Tabela 37 Custos adicionais para elevar o nível das estruturas de armazenagem

Custo adicional para elevar o nível do conjunto (R\$/nível)	Padrão 1	Padrão 2
	- Stacker - Empilhadeira a gás - Empilhadeira elétrica	- Empilhadeira retrátil - Empilhadeira bilateral - Empilhadeira trilateral
Custo da elevação do conjunto (R\$/conjunto)	R\$ 26,70	R\$ 28,42
Custo do conjunto de armazenagem acima do solo (R\$/conjunto)	R\$ 272,78	R\$ 307,94

Através da composição destes custos é possível realizar o cálculo do coeficiente de custos para cada uma das variáveis envolvidas no cálculo da otimização do leiaute do armazém.

4.9 COMPOSIÇÃO DOS COEFICIENTES DAS VARIÁVEIS

Através da composição de custos do subtítulo anterior é possível elaborar a matriz de coeficientes de custos que servirá de base para a simulação através do modelo de programação binária.

A composição destes coeficientes toma como base a função objetivo (equação 60) e utilizam-se as equações 68, 71 e 72 para encontrar os custos relativos.

É importante mencionar que para qualquer posição no solo, ou seja, $k = 1$, não incidirão os custos verticais relativos à operação (Coh) e à construção (Ccv). Por sua vez, ao analisar a elevação do prédio ($k > 1$), estes custos incidirão.

Para efeito de análise, os custos de operação serão considerados pelos próximos 120 meses (w), para avaliar quais os resultados obtidos em 10 anos de operação deste armazém.

Outro índice utilizado é a demanda fixa (D_{ijk}) para cada uma dos conjuntos. Neste caso, a demanda utilizada foi considerada em 6 deslocamentos (por período) para cada posição palete. Como o modelo está indexado em conjunto de armazenagem, e o mesmo contém 3 posições paletes, para cada conjunto, tem-se que a demanda será de 18 deslocamentos.

A tabela 38 foi elaborada como base dos parâmetros que serão utilizados para o cálculo dos coeficientes da função objetivo.

Tabela 38 Parâmetros para o cálculo dos coeficientes da função objetivo

Equipamento	Parâmetros de Operação do Armazém		Custo do conjunto de armazenagem (R\$/conjunto)		Custo de Construção do Prédio (CP) - R\$/ Conjunto de Armazenagem		Custo do Terreno (CT) - R\$/ Conjunto de Armazenagem	Custo do deslocamento na Vertical - Cmv_v (R\$/ Nível)
	Horizonte de Tempo - meses (w)	Demanda no período (D)	Horizontal, h	Vertical, v	Horizontal, h	Vertical, v	Horizontal, h	
Stacker	120	18	R\$ 246,08	R\$ 272,78	R\$ 7.850,90	R\$ 5.495,63	R\$ 2.167,56	1,57841
Empilhadeira a combustão	120	18	R\$ 246,08	R\$ 272,78	R\$ 11.034,32	R\$ 7.724,02	R\$ 3.046,48	0,47908
Empilhadeira elétrica	120	18	R\$ 246,08	R\$ 272,78	R\$ 10.203,86	R\$ 7.142,70	R\$ 2.817,19	0,37761
Empilhadeira Retrátil	120	18	R\$ 279,53	R\$ 307,94	R\$ 8.426,32	R\$ 5.898,43	R\$ 2.326,43	0,39587
Empilhadeira Bilateral	120	18	R\$ 279,53	R\$ 307,94	R\$ 5.310,83	R\$ 3.717,58	R\$ 1.466,27	0,37403
Empilhadeira Trilateral	120	18	R\$ 279,53	R\$ 307,94	R\$ 6.160,51	R\$ 4.312,35	R\$ 1.700,86	0,40176

A equação 97 apresenta o cálculo do coeficiente de custos para a posição $i = 1, j = 1$ e $k = 1$ para o equipamento *stacker*, considerando o incremento de custo para o terreno sendo 0.

$$CFo = w \cdot D_{ijk} (Co_h + Co_v) + (CC_h + CC_v) \therefore \quad (97)$$

$$CFo = 18 \cdot 120 \cdot (0,28509 + 0) + (246,08 + 7850,90 + 2167,56) = 10.880,33$$

A planilha eletrônica “Coeficientes FObjetivo.xlsx” contida no CD-Dados no Apêndice J, contém os cálculos de todos os coeficientes relativos a cada equipamento de movimentação e suas respectivas variações no custo do terreno. Pode-se observar nesta planilha que os custos relativos ao terreno somente impactam as posições em nível solo ($k=1$), para as demais posições acima do solo ($k>1$) estes custos não alteram os valores dos coeficientes.

A partir destes coeficientes é possível realizar as simulações identificadas que fazem parte do objetivo deste trabalho e estas simulações poderão ser vistas no próximo capítulo.

5 SIMULAÇÃO DO MODELO PROPOSTO

O *software* utilizado para a simulação dos modelos é o AIMMS (um acrônimo para *Advanced Interactive Multidimensional Modeling System* – Sistema Avançado Interativo de Modelagem Multidimensional). De fabricação Holandesa, este *software* é uma plataforma robusta para o desenvolvimento de sistemas de decisão baseados em modelos de otimização. Este *software* foi criado em 1993 por Johannes J. Bisschop e Marcel Roelofs através da criação da empresa Paragon Decision Technology. O endereço na internet para o *download* do *software* é www.aimms.com onde vários modelos do *software* podem ser encontrados.

O *software* apresenta uma interatividade grande com o usuário, mas para programação do mesmo é necessário o entendimento de linguagens de programação, bem como conceitos de cálculo.

Ele apresenta uma linguagem algébrica suportada por estruturas de dados bastante genéricas (envolvendo conjuntos, subconjuntos, e suas relações) permitindo a indexação dos diversos elementos de um modelo de otimização. Elementos esses que incluem, entre outros, parâmetros, variáveis, calendários, períodos, restrições, função objetivo, entre outros.

A linguagem algébrica disponível no AIMMS suporta também a implementação de conceitos avançados de otimização como geração de colunas e programação estocástica. Em auxílio ao processo de compilação e depuração dos modelos, o AIMMS oferece um *math inspector* (inspetor de cálculo) que permite examinar as equações matemáticas.

Também oferece um ambiente para armazenagem de todas as informações (dados de entrada, parâmetros do modelo, etc.) associadas a um cenário particular de otimização, frequentemente chamado caso, permitindo gerenciar simulações de cenários.

Possui uma Interface Gráfica (GUI) para desenvolvimento de páginas de interface contendo objetos interativos como gráficos, redes, tabelas, mapas, entre outros.

Apresenta a utilização de *solvers* (solucionadores) diversos, sendo estes formados por rotinas matemáticas para resolução de problemas de otimização (Programação Linear, Programação Inteira Mista, Programação Quadrática, Programação não linear, entre outros).

Outro fator relevante é a interfaces de dados para integração com aplicações externas, baseadas em padrões como Excel, XML, ODBC, OLE DB, COM Object, API, Web Services, entre outros.

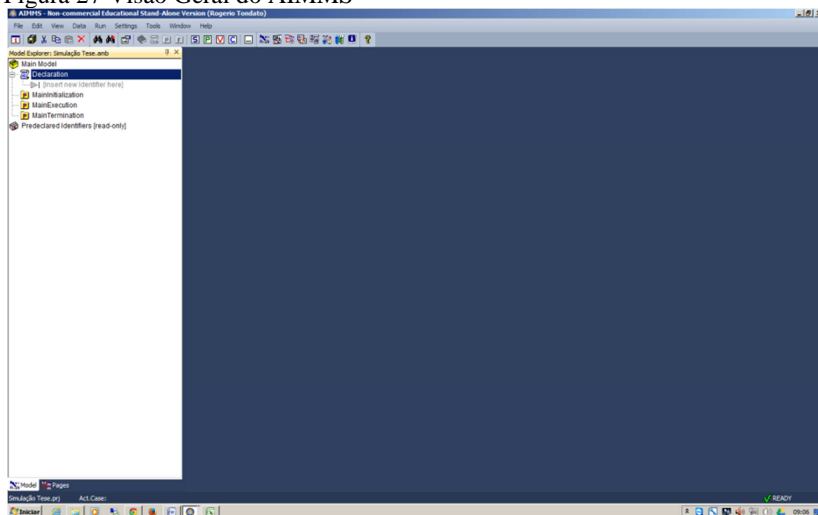
Além das características citadas acima, o fator determinante para a escolha deste *software* é que o mesmo apresenta uma Licença Educacional livre e sem custo. Neste caso, inclui também o acesso ao *software* completo, sem limites para o número de variáveis e ou restrições para uso onde não haja fins comerciais. Sendo assim, a escolha foi relativa a este fato, tendo em vista que o modelo apresenta mais de 27 mil variáveis.

O primeiro passo do *software* é entender sua lógica de programação, para assim apresentar a modelagem do modelo proposto através de sua linguagem.

5.1 PROGRAMAÇÃO DO AIMMS

O AIMMS apresenta uma tela interativa através de janelas e possui 4 divisões básicas que estão contidas na estrutura chamada de “*Main Model*”, conforme figura 30. A primeira delas é denominada “*Declaration*” onde são inseridas todas as informações relativas ao modelo, podendo ser dividida em uma ou mais seções.

Figura 27 Visão Geral do AIMMS



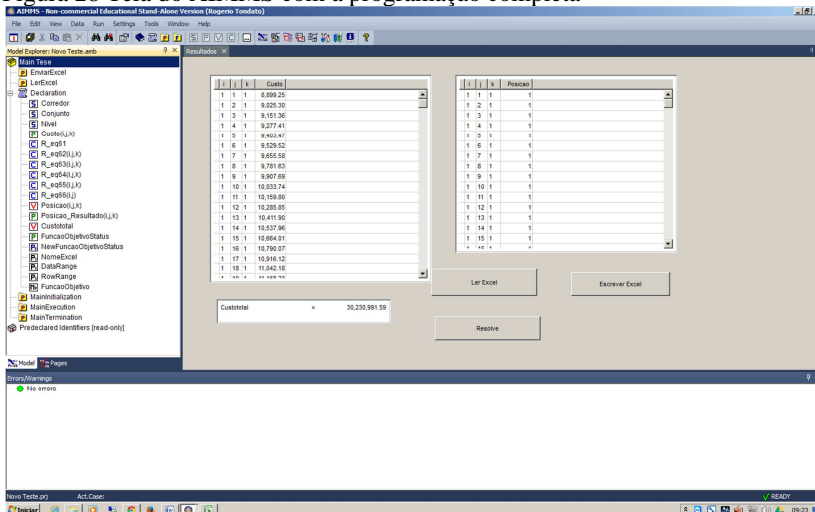
A segunda, terceira e quarta seções são denominadas de “*Procedure*” e possuem 3 processos iniciais: *MainInitialization* (Processo de Inicialização), *MainExecution* (Processo de Execução) e *MainTermination* (Processo de Finalização). Uma vez programado o

modelo, estes três processos garantem o início, a execução e a finalização da modelagem e otimização desejadas.

Para que o *software* possa ler todas as informações dos coeficientes da função objetivo, é necessário realizar uma importação destes dados da Planilha Eletrônica para o AIMMS. Da mesma forma, os resultados de cada simulação precisam ser enviados para Planilhas Eletrônicas para posterior tabulação, dois novos “*Procedure*” são criados. Um chamado de “LerExcel” para importar os dados dos coeficientes da função objetivo e outro “EnviarExcel” para exportar os dados resultantes de cada simulação.

A figura 31 apresenta o modelo programado completo, onde podem ser observados todos os detalhes aqui citados.

Figura 28 Tela do AIMMS com a programação completa



O primeiro passo é determinar todos os conjuntos da variável, que neste caso assume os índices i, j, k . No AIMMS estes são chamados de “*SET*” e foram nomeados como Corredor (para i), Conjunto (para j) e Nivel (para k). Os limites destes conjuntos são dados pela planilha eletrônica “Coeficientes FObjetivo.xlsx” contida no CD-Dados no Apêndice J, para cada respectivo equipamento de movimentação.

Posteriormente é necessário atribuir parâmetros para cada informação necessária para a função objetivo e para os resultados de cada posição utilizados. Assim sendo, foram criados os parâmetros “Custo(i, j, k)” (que armazenam as informações relativa aos custos de

cada variável (i,j,k) e “Posição_Resultado(i,j,k)” (que armazenam as informações de quais variáveis tiveram seu resultado igual a 1, ou seja, serão utilizadas pelo modelo).

A partir daqui são criadas as duas variáveis do problema, sendo “Posicao(i,j,k)” para a variável binária da posição e a variável “Custototal” que atribui valor da função objetivo (z).

Através delas é realizada a programação da função matemática que calcula a função objetivo realizando o produto entre a variável Posicao(i,j,k) e o parâmetro “Custo(i,j,k)”, resultando na variável “Custototal” (z).

Da mesma forma são criadas as 6 restrições ao problema que estão denominadas como “R_eq61” que diz respeito a equação 61 do presente trabalho. As demais restrições seguem a mesma lógica.

Por último são criadas os parâmetros de sequência “NomeExcel”, “DataRange” e “Row Range” que são utilizados como elementos da programação dos processos de “LerExcel” “EnviarExcel”.

Terminada a programação, deve-se criar uma página de interface para o manuseio da programação, sendo que esta apresenta as tabelas de custo de cada posição (Custo(i,j,k)), o resultado das variáveis (Posicao(i,j,k)) e o resultado da função objetivo (Custototal (z)).

Por último, três botões de interação com o *software* foram elaborados. Um para ler os dados do Excel (chamado de “Ler Excel”), outro para exportar para o Excel (chamado de “Escrever Excel”) e por último o botão “Resolve”, que aplica a modelagem e mostra o resultado.

Além da figura 31 é possível verificar toda a programação do modelo no arquivo “ModelagemTese.aimmspack” contido no CD-Dados no Apêndice J. Para tanto, deve-se fazer o download do programa no site www.aimms.com e realizar o registro acadêmico para visualizar o programa.

5.2 SIMULAÇÃO DOS CENÁRIOS

Foram realizadas 150 simulações, variando a quantidade de conjuntos necessários, o equipamento de movimentação utilizado e o custo do terreno associado (considerando o acréscimo e decréscimo deste custo).

Outro fator importante é que as simulações foram baseadas em conjuntos contendo 3 posições paletes, sendo que o resultado do *software* é por conjunto, tendo que considerar este índice para encontrar a quantidade de posições paletes total.

Os resultados das simulações encontram-se na pasta “Resultados Simulação” no CD-Dados no Apêndice J, onde podem ser verificadas 6 pastas, uma para cada equipamento de movimentação, contendo 6 planilhas eletrônicas onde cada uma apresenta a simulação para um determinado equipamento e quantidade de conjuntos e uma planilha de resultados compilados. Dentro de cada planilha eletrônica encontram-se as 5 simulações para cada um dos cenários de custo do terreno.

Como exemplo pode-se declarar que a planilha eletrônica “SimStacker200.xlsx” contida dentro da pasta “*Stacker*” que está dentro da pasta “Resultados Simulação” no CD-Dados no Apêndice J, refere-se a simulação para o *Stacker* contendo uma necessidade de armazenagem de 200 conjuntos (ou 600 posições paletes). Dentro desta planilha existem 6 planos que são atribuídos conforme tabela 39.

Para todas as outras planilhas eletrônicas, a lógica de identificação do Plano com a descrição da simulação, segue a mesma lógica.

Tabela 39 Identificação na planilha eletrônica dos resultados para cada simulação

Plano/ Folha	Descrição
Plan1	Parâmetros para a simulação (coeficientes da função objetivo).
Plan2	Resultados da Simulação considerando um decréscimo de 50% no custo do terreno.
Plan3	Resultados da Simulação considerando um decréscimo de 25% no custo do terreno.
Plan4	Resultados da Simulação considerando o custo alvo do terreno.
Plan5	Resultados da Simulação considerando um acréscimo de 25% no custo do terreno.
Plan6	Resultados da Simulação considerando um acréscimo de 50% no custo do terreno.
Plan7	Resultados Tabulados

Para identificar as planilhas eletrônicas de simulação a qual varia os valores de quantidade de conjunto, bem como o tipo de equipamento de movimentação, apresenta-se a tabela 40.

Tabela 40 Identificação das planilhas eletrônicas de simulação

Nome da Planilha	Código	Equipamento	Quantidade de Conjuntos
SimStacker200.xlsx	Stacker	Stacker	200
SimStacker500.xlsx	Stacker	Stacker	500
SimStacker1000.xlsx	Stacker	Stacker	1.000
SimStacker2000.xlsx	Stacker	Stacker	2.000
SimStacker3000.xlsx	Stacker	Stacker	3.000
SimStackerResultados.xlsx	Resultados compilados do Stacker		
SimEmpGas200.xlsx	EmpGas	Empilhadeira a Combustão	200
SimEmpGas500.xlsx	EmpGas	Empilhadeira a Combustão	500
SimEmpGas1000.xlsx	EmpGas	Empilhadeira a Combustão	1.000
SimEmpGas2000.xlsx	EmpGas	Empilhadeira a Combustão	2.000
SimEmpGas3000.xlsx	EmpGas	Empilhadeira a Combustão	3.000
SimEmpGasResultados.xlsx	Resultados compilados da Empilhadeira a Combustão		
SimEmpEle200.xlsx	EmpEle	Empilhadeira Elétrica	200
SimEmpEle500.xlsx	EmpEle	Empilhadeira Elétrica	500
SimEmpEle1000.xlsx	EmpEle	Empilhadeira Elétrica	1.000
SimEmpEle2000.xlsx	EmpEle	Empilhadeira Elétrica	2.000
SimEmpEle3000.xlsx	EmpEle	Empilhadeira Elétrica	3.000
SimEmpEleResultados.xlsx	Resultados compilados da Empilhadeira Elétrica		
SimEmpRet200.xlsx	EmpRet	Empilhadeira Retrátil	200
SimEmpRet500.xlsx	EmpRet	Empilhadeira Retrátil	500
SimEmpRet1000.xlsx	EmpRet	Empilhadeira Retrátil	1.000
SimEmpRet2000.xlsx	EmpRet	Empilhadeira Retrátil	2.000
SimEmpRet3000.xlsx	EmpRet	Empilhadeira Retrátil	3.000
SimEmpRetResultados.xlsx	Resultados compilados da Empilhadeira Retrátil		
SimEmpBi200.xlsx	EmpBi	Empilhadeira Bi	200
SimEmpBi500.xlsx	EmpBi	Empilhadeira Bi	500
SimEmpBi1000.xlsx	EmpBi	Empilhadeira Bi	1.000
SimEmpBi2000.xlsx	EmpBi	Empilhadeira Bi	2.000
SimEmpBi3000.xlsx	EmpBi	Empilhadeira Bi	3.000
SimEmpBiResultados.xlsx	Resultados compilados da Empilhadeira Biltreral		
SimEmpTri200.xlsx	EmpTri	Empilhadeira Tri	200
SimEmpTri500.xlsx	EmpTri	Empilhadeira Tri	500
SimEmpTri1000.xlsx	EmpTri	Empilhadeira Tri	1.000
SimEmpTri2000.xlsx	EmpTri	Empilhadeira Tri	2.000
SimEmpTri3000.xlsx	EmpTri	Empilhadeira Tri	3.000
SimEmpTriResultados.xlsx	Resultados compilados da Empilhadeira Trilateral		

5.2.1 Resultados e Análises da Simulação para o Stacker

O Stacker é o equipamento mais simples dentre todos avaliados e apresenta a menor capacidade de verticalização dentre todos.

O primeiro resultado analisado das simulações variando o custo do terreno, bem como a quantidade de conjuntos necessários é a análise do percentual de ocupação de cada nível. Ou seja, como o modelo apresenta o desenho de cada simulação em percentual de conjuntos existentes em cada nível. A tabela 41 apresenta estes resultados

compilados, considerando a variação do custo do terreno e a quantidade de conjuntos.

Tabela 41 Percentual de ocupação dos níveis para o *Stacker*

Qtd. de Conjuntos	Nível	Variações no Custo do Terreno				
		-50	-25	0	25	50
200	Nível 1	48%	38%	35%	35%	35%
	Nível 2	44%	38%	35%	35%	35%
	Nível 3	9%	25%	31%	31%	31%
500	Nível 1	45%	40%	35%	35%	35%
	Nível 2	45%	40%	35%	35%	35%
	Nível 3	10%	20%	30%	30%	30%
1000	Nível 1	35%	35%	35%	35%	34%
	Nível 2	35%	35%	35%	35%	34%
	Nível 3	30%	30%	30%	30%	32%
2000	Nível 1	35%	35%	34%	34%	34%
	Nível 2	35%	35%	34%	34%	34%
	Nível 3	30%	31%	32%	32%	32%
3000	Nível 1	35%	35%	34%	34%	34%
	Nível 2	35%	35%	34%	34%	34%
	Nível 3	30%	31%	33%	33%	33%

Pode-se observar através da tabela 41 que existe uma maior variação percentual para baixas quantidades de conjunto (200 e 500 posições) para o terceiro nível. Ou seja, o terceiro nível para estas quantidades de posições só é requisitado em maior percentual quando existe o aumento significativo no custo do terreno.

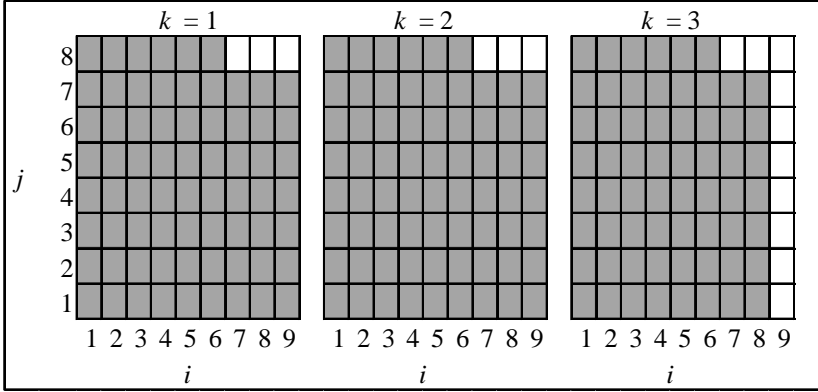
Em contrapartida, para grandes quantidades de conjuntos, esta variação percentual entre os níveis diminui com relação ao custo do terreno. Este fato pode ser observado e corrobora que o *Stacker* não é apropriado para grandes quantidades de conjuntos, devido a sua limitação de altura e de velocidade de transporte, fazendo com que para grandes quantidades quase não exista diferença nas variações do custo do terreno.

Para avaliar quais posições (i,j,k) foram utilizados pela simulação em cada um dos casos, em outras palavras, quais variáveis tiveram seus resultados igual a 1, deve-se visualizar através das planilhas eletrônicas

contidas no CD-Dados no Apêndice J, na pasta “Resultados Simulação”, para todos os casos simulados.

Para representar como ficaria a configuração do armazém, a figura 32, demonstra os 3 níveis e suas ocupações para o *Stacker* contendo 200 conjuntos e o custo do terreno sendo o custo inicial (sem incremento ou decréscimo). Os espaços em branco indicam que essas posições não existiriam na configuração deste leiaute.

Figura 29 Configuração do Armazém para o *Stacker* com 200 posições sem alteração no custo do terreno



Pode-se verificar que os corredores 7 e 8 não teriam o conjunto 8 nos três níveis e o conjunto 9 não apresentaria o conjunto 8 nos níveis 1 e 2 e também não teria o terceiro nível.

Assim, os custos totais de operação nestas simulações podem ser avaliados através da tabela 42, que apresenta os resultados da função objetivo para cada uma das variações apresentadas.

Tabela 42 Resultados da Função Objetivo para o *Stacker*

Custo F.O.	Quantidade de Posições				
Custo Terreno	200	500	1000	2000	3000
-50	R\$ 2.273.183,73	R\$ 6.374.835,91	R\$ 14.297.026,15	R\$ 32.952.572,92	R\$ 54.443.937,09
-25	R\$ 2.314.500,39	R\$ 6.472.305,86	R\$ 14.487.771,65	R\$ 33.327.561,24	R\$ 55.009.032,57
0	R\$ 2.353.424,85	R\$ 6.567.136,73	R\$ 14.678.517,16	R\$ 33.698.454,49	R\$ 55.563.418,21
25	R\$ 2.390.815,30	R\$ 6.661.967,59	R\$ 14.869.262,67	R\$ 34.069.107,69	R\$ 56.111.269,65
50	R\$ 2.428.205,76	R\$ 6.756.798,45	R\$ 15.055.543,83	R\$ 34.439.760,89	R\$ 56.659.121,09

Pode-se verificar que existe uma variação no valor da função objetivo para mais ou para menos quando se comparado apenas à variação do terreno para uma mesma quantidade de conjuntos. Assim,

aponta-se que a maior variação ocorreu para a menor quantidade de posições, ficando com uma diferença entre os extremos no custo do terreno de mais de 6,5%. Estas diferenças podem ser avaliadas na tabela 43.

Tabela 43 Variação na Função Objetivo em relação ao custo padrão do terreno

% Variação	Quantidade de Posições				
Custo Terreno	200	500	1000	2000	3000
-50	-3,41%	-2,93%	-2,60%	-2,21%	-2,01%
-25	-1,65%	-1,44%	-1,30%	-1,10%	-1,00%
0	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%
25	1,59%	1,44%	1,30%	1,10%	0,99%
50	3,18%	2,89%	2,57%	2,20%	1,97%
Diferença entre os extremos	6,59%	5,82%	5,17%	4,41%	3,99%

A tabela 43 demonstra a variação sempre em comparação com o custo padrão do terreno, que neste caso está denominado na tabela como “0”. Pode-se avaliar novamente que esta diferença entre os extremos também diminui conforme aumenta a quantidade de conjuntos simulados. Isto pode reafirmar que para maiores quantidades de conjunto para este tipo de estrutura, como não existe um grande alcance na verticalização, tende-se a diminuir o impacto do custo do terreno.

5.2.2 Resultados e Análise da Simulação para a Empilhadeira a Combustão

A empilhadeira a combustão apresenta um nível adicional em relação ao *Stacker*, o que pode proporcionar uma melhor avaliação da verticalização e ou horizontalização. A tabela 44 apresentam as variações do percentual de ocupação para cada uma das simulações realizadas.

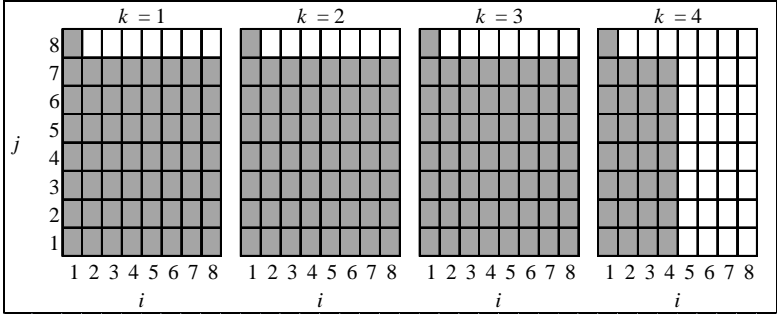
Para as quantidades de conjuntos menores, observa-se que o nível 4 somente é aceitável a partir da variação do custo do terreno sendo zero. Já para as quantidades maiores, o quarto nível pode ser incrementado já para os custos de terreno sendo menores. Isto pode ser explicado através da limitação no nível de altura, que apesar de ser maior que o do *Stacker*, ainda é limitado a 4 níveis.

Tabela 44 Percentual de ocupação dos níveis para a Empilhadeira a Gás

		Variações no Custo do Terreno				
Quantidade de Conjuntos	Nível	-50	-25	0	25	50
200	Nível 1	32%	30%	29%	25%	25%
	Nível 2	32%	30%	29%	25%	25%
	Nível 3	32%	30%	29%	25%	25%
	Nível 4	4%	12%	15%	25%	25%
500	Nível 1	30%	27%	25%	25%	25%
	Nível 2	30%	27%	25%	25%	25%
	Nível 3	30%	27%	25%	25%	25%
	Nível 4	9%	18%	25%	25%	25%
1000	Nível 1	28%	27%	27%	25%	25%
	Nível 2	28%	27%	27%	25%	25%
	Nível 3	28%	27%	25%	25%	25%
	Nível 4	17%	21%	22%	25%	25%
2000	Nível 1	27%	26%	25%	25%	25%
	Nível 2	27%	26%	25%	25%	25%
	Nível 3	27%	26%	25%	25%	25%
	Nível 4	18%	22%	25%	25%	25%
3000	Nível 1	27%	26%	25%	25%	25%
	Nível 2	27%	26%	25%	25%	25%
	Nível 3	27%	26%	25%	25%	25%
	Nível 4	20%	23%	25%	25%	25%

Para se visualizar uma possível configuração do armazém, a figura 33 apresenta o leiaute para 200 conjuntos e o custo do terreno padrão. Os espaços em branco indicam que aquela posição não faz parte do leiaute.

Figura 30 Leiaute do Armazém para a Empilhadeira a Combustão com 200 conjuntos e custo padrão do terreno



Assim, os resultados da função objetivo podem ser analisados na tabela 45. Pode-se observar que os custos também são alterados devido à variação no custo do terreno.

Tabela 45 Resultados da Função Objetivo para a Empilhadeira a Combustão

Custo F.O.	Quantidade de Posições				
Custo Terreno	200	500	1000	2000	3000
-50	R\$ 2.226.296,93	R\$ 5.683.541,46	R\$ 11.624.042,92	R\$ 23.959.677,36	R\$ 36.749.656,31
-25	R\$ 2.272.605,44	R\$ 5.792.159,91	R\$ 11.832.712,97	R\$ 24.366.697,32	R\$ 37.353.435,05
0	R\$ 2.313.145,11	R\$ 5.890.841,51	R\$ 12.027.862,13	R\$ 24.754.465,30	R\$ 37.935.768,09
25	R\$ 2.351.226,07	R\$ 5.986.043,90	R\$ 12.218.266,90	R\$ 25.135.274,84	R\$ 38.506.982,39
50	R\$ 2.389.307,02	R\$ 6.081.246,28	R\$ 12.408.671,66	R\$ 25.516.084,37	R\$ 39.078.196,70

Observa-se que a variação em percentual fica muito próxima independente da variação da quantidade de conjuntos. Este fator está associado a um maior custo de operação do equipamento a Combustão. A tabela 45 apresenta os resultados das variações relativas à função objetivo.

Tabela 46 Variação na Função Objetivo em relação ao custo padrão do terreno

% Variação	Quantidade de Posições				
Custo Terreno	200	500	1000	2000	3000
-50	-3,75%	-3,52%	-3,36%	-3,21%	-3,13%
-25	-1,75%	-1,68%	-1,62%	-1,57%	-1,54%
0	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%
25	1,65%	1,62%	1,58%	1,54%	1,51%
50	3,29%	3,23%	3,17%	3,08%	3,01%
Diferença entre os extremos	7,05%	6,75%	6,52%	6,29%	6,14%

Apesar da pequena variação, pode-se observar um decréscimo nesta influência do terreno de até um ponto percentual entre a menor quantidade de conjuntos e a maior quantidade de conjuntos. Demonstrando que para quantidades menores de conjunto, a economia tende a ser maior quando alterado o custo do terreno.

5.2.3 Resultados e Análise da Simulação para a Empilhadeira Elétrica

A empilhadeira Elétrica possui um custo de operação pouco inferior a da empilhadeira a Combustão, entretanto, por possuir maior valor de aquisição, esta acaba tendo um valor maior para a

movimentação horizontal o que reflete na distribuição dos percentuais de posições ocupadas por nível, como demonstra a tabela 47.

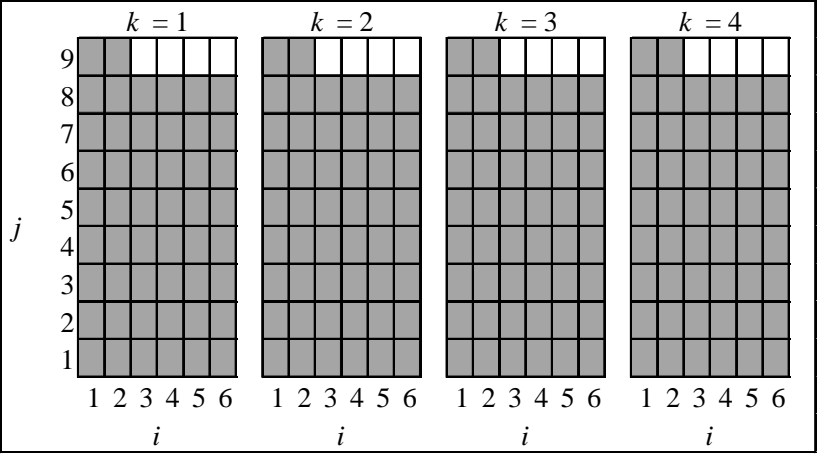
Tabela 47 Percentual de ocupação dos níveis para a Empilhadeira Elétrica

Quantidade de Conjuntos	Nível	Variações no Custo do Terreno				
		-50	-25	0	25	50
200	Nível 1	27,0%	25,0%	25,0%	25,0%	25,0%
	Nível 2	27,0%	25,0%	25,0%	25,0%	25,0%
	Nível 3	27,0%	25,0%	25,0%	25,0%	25,0%
	Nível 4	19,0%	25,0%	25,0%	25,0%	25,0%
500	Nível 1	25,6%	25,0%	25,0%	25,0%	25,0%
	Nível 2	25,6%	25,0%	25,0%	25,0%	25,0%
	Nível 3	25,6%	25,0%	25,0%	25,0%	25,0%
	Nível 4	23,2%	25,0%	25,0%	25,0%	25,0%
1000	Nível 1	26,3%	25,0%	25,0%	25,0%	25,0%
	Nível 2	26,3%	25,0%	25,0%	25,0%	25,0%
	Nível 3	26,3%	25,0%	25,0%	25,0%	25,0%
	Nível 4	21,1%	25,0%	25,0%	25,0%	25,0%
2000	Nível 1	25,6%	25,6%	25,0%	25,0%	25,0%
	Nível 2	25,6%	25,6%	25,0%	25,0%	25,0%
	Nível 3	25,6%	25,6%	25,0%	25,0%	25,0%
	Nível 4	23,2%	23,2%	25,0%	25,0%	25,0%
3000	Nível 1	25,5%	25,5%	25,0%	25,0%	25,0%
	Nível 2	25,5%	25,5%	25,0%	25,0%	25,0%
	Nível 3	25,5%	25,5%	25,0%	25,0%	25,0%
	Nível 4	23,5%	23,5%	25,0%	25,0%	25,0%

Pode-se observar que o quarto nível só não é exigido no custo do terreno com variação a menor em 50%. Isto demonstra que o custo do terreno torna-se menos significativo a este equipamento visto que seu custo de operação tende a ser maior. Por isso é comum este tipo de equipamento somente ser adquirido para situações em que a operação com a Empilhadeira a Combustão não é permitida (ambientes fechados e ou sem ventilação).

A possível configuração de um armazém com este equipamento considerando 200 conjuntos e custo padrão do terreno pode ser visto na figura 34.

Figura 31 Leiaute do Armazém para a Empilhadeira Elétrica com 200 conjuntos e custo padrão do terreno



Assim sendo, seu custo de operação total tende a ser menor devido a um custo menor na ocupação de área e custos com área construída, conforme demonstra a tabela 48.

Tabela 48 Resultados da Função Objetivo para a Empilhadeira Elétrica

Custo F.O	Quantidade de Posições				
Custo Terreno	200	500	1000	2000	3000
-50	R\$ 2.065.389,58	R\$ 5.307.017,90	R\$ 10.952.716,47	R\$ 22.844.008,79	R\$ 35.350.140,66
-25	R\$ 2.100.829,60	R\$ 5.396.222,50	R\$ 11.130.289,06	R\$ 23.204.609,68	R\$ 35.888.929,10
0	R\$ 2.136.044,53	R\$ 5.484.259,82	R\$ 11.306.363,71	R\$ 23.557.851,71	R\$ 36.417.454,47
25	R\$ 2.171.259,46	R\$ 5.572.297,15	R\$ 11.482.438,37	R\$ 23.910.001,02	R\$ 36.945.678,43
50	R\$ 2.206.474,39	R\$ 5.660.334,48	R\$ 11.658.513,02	R\$ 24.262.150,32	R\$ 37.473.902,39

A variação pequena devido às alterações na quantidade de conjuntos pode ser observada na tabela 49. Verifica-se que esta mantém um padrão de variação independente da quantidade de conjuntos exigidos (variação menor que 1%), o que reflete a pouca influência do terreno em relação a sua verticalização.

Tabela 49 Variação na Função Objetivo em relação ao custo padrão do terreno

% Variação Custo Terreno	Quantidade de Posições				
	200	500	1000	2000	3000
-50	-3,31%	-3,23%	-3,13%	-3,03%	-2,93%
-25	-1,65%	-1,61%	-1,56%	-1,50%	-1,45%
0	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%
25	1,65%	1,61%	1,56%	1,49%	1,45%
50	3,30%	3,21%	3,11%	2,99%	2,90%
Diferença entre os extremos	6,60%	6,44%	6,24%	6,02%	5,83%

5.2.4 Resultados e Análise da Simulação para a Empilhadeira Retrátil

A partir da Empilhadeira Retrátil, uma análise mais apurada é necessária. Estes equipamentos consomem muito menos área devido a suas dimensões reduzidas, e possuem uma capacidade maior de elevação que os três equipamentos anteriores. Na simulação realizada podem-se observar os percentuais de ocupação dos níveis para cada variação. Assim, a tabela 50 apresenta o resumo das simulações realizadas.

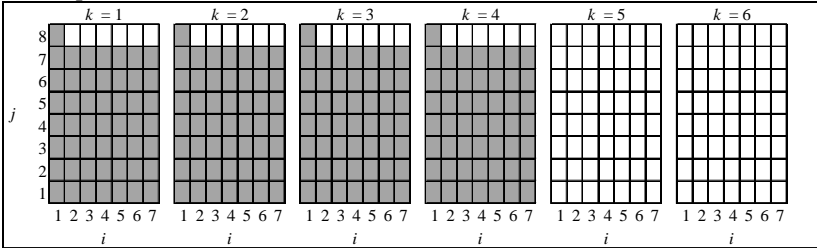
Pode-se observar que para a menor quantidade de conjunto utiliza-se apenas até o nível 4, sendo que para a maior quantidade de conjuntos de armazenagem, o nível 6 é requerido, demonstrando que não necessariamente utiliza-se toda a verticalização devido a capacidade do equipamento.

Tabela 50 Percentual de ocupação dos níveis para a Empilhadeira Retrátil

		Variações no Custo do Terreno				
Quantidade de Conjuntos	Nível	-50	-25	0	25	50
200	Nível 1	29,5%	26,5%	25,0%	25,0%	22,5%
	Nível 2	29,5%	26,5%	25,0%	25,0%	22,5%
	Nível 3	29,5%	26,5%	25,0%	25,0%	22,5%
	Nível 4	11,5%	20,5%	25,0%	25,0%	22,5%
	Nível 5	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%	10,0%
	Nível 6	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%
500	Nível 1	27,2%	25,4%	22,8%	22,8%	21,2%
	Nível 2	27,2%	25,4%	22,8%	22,8%	21,2%
	Nível 3	27,2%	25,4%	22,8%	22,8%	21,2%
	Nível 4	18,4%	19,4%	22,8%	22,8%	21,2%
	Nível 5	0,0%	4,4%	8,8%	8,8%	15,2%
	Nível 6	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%
1000	Nível 1	24,5%	23,1%	22,0%	21,7%	20,2%
	Nível 2	24,5%	23,1%	22,0%	21,7%	20,2%
	Nível 3	24,5%	23,1%	22,0%	21,7%	20,2%
	Nível 4	17,5%	20,3%	22,0%	21,7%	20,2%
	Nível 5	9,0%	10,4%	12,0%	13,2%	15,0%
	Nível 6	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%	4,2%
2000	Nível 1	22,5%	21,5%	20,5%	19,6%	19,6%
	Nível 2	22,5%	21,5%	20,5%	19,6%	19,6%
	Nível 3	22,5%	21,5%	20,5%	19,6%	19,6%
	Nível 4	17,7%	19,6%	19,6%	19,6%	19,6%
	Nível 5	11,0%	11,9%	12,0%	14,8%	14,8%
	Nível 6	4,0%	4,0%	7,0%	7,0%	7,0%
3000	Nível 1	20,4%	20,4%	19,6%	18,9%	18,8%
	Nível 2	20,4%	20,4%	19,6%	18,9%	18,8%
	Nível 3	20,4%	20,4%	19,6%	18,9%	18,8%
	Nível 4	18,9%	18,9%	19,6%	18,9%	18,8%
	Nível 5	12,7%	12,7%	13,5%	15,0%	15,1%
	Nível 6	7,2%	7,2%	8,0%	9,5%	9,9%

A possível configuração de um armazém com este equipamento considerando 200 conjuntos e custo padrão do terreno pode ser visto na figura 35.

Figura 32 Leiaute do Armazém para a Empilhadeira Retrátil com 200 conjuntos e custo padrão do terreno



Os custos da função objetivo podem ser analisados na tabela 51 e pode-se observar que estes se alteram conforme a alteração das variáveis.

Tabela 51 Percentual de ocupação dos níveis para a Empilhadeira Retrátil

Custo F.O.	Quantidade de Posições				
Custo Terreno	200	500	1000	2000	3000
-50	R\$ 1.848.914,38	R\$ 4.855.974,45	R\$ 10.214.037,92	R\$ 21.775.206,77	R\$ 34.141.127,57
-25	R\$ 1.880.305,75	R\$ 4.930.138,34	R\$ 10.350.040,85	R\$ 22.025.643,73	R\$ 34.497.071,70
0	R\$ 1.911.126,88	R\$ 4.999.997,99	R\$ 10.483.175,02	R\$ 22.266.504,20	R\$ 34.844.049,16
25	R\$ 1.940.207,29	R\$ 5.066.301,30	R\$ 10.609.463,66	R\$ 22.495.650,59	R\$ 35.185.578,41
50	R\$ 1.967.040,22	R\$ 5.132.384,35	R\$ 10.728.252,90	R\$ 22.723.059,35	R\$ 35.513.558,50

Neste caso, a diferença entre os custos da função objetivo, considerando o maior e o menor custo de terreno, gradativamente diminui, conforme se aumenta a quantidade de conjuntos simulados (tabela 52).

Tabela 52 Variação na Função Objetivo em relação ao custo padrão do terreno

% Variação	Quantidade de Posições				
Custo Terreno	200	500	1000	2000	3000
-50	-3,26%	-2,88%	-2,57%	-2,21%	-2,02%
-25	-1,61%	-1,40%	-1,27%	-1,08%	-1,00%
0	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%
25	1,52%	1,33%	1,20%	1,03%	0,98%
50	2,93%	2,65%	2,34%	2,05%	1,92%
Diferença entre os extremos	6,18%	5,53%	4,91%	4,26%	3,94%

Pode-se verificar também que o custo final da operação acaba sendo menor que os outros equipamentos, devido sua menor ocupação de área, bem como maior produtividade dos equipamentos envolvidos.

5.2.5 Resultados e Análise da Simulação para a Empilhadeira Bilateral

A empilhadeira Bilateral possui um nível a mais que a empilhadeira retrátil e possui a capacidade de recolher os paletes sem realizar manobras, o que encurta ainda mais o espaço requerido. Sendo assim, as variações das posições ocupadas, podem ser vistas na tabela 53.

Pode-se verificar que para até 500 conjuntos, pouca área do nível 4 é utilizada, sendo somente o nível 5 utilizado a partir de 1000 conjuntos e somente para 3000 conjuntos verifica-se a utilização do 6 nível.

Em nenhuma das simulações realizadas o nível 7 foi requerido, o que demonstra que para os custos envolvidos, não é válida a utilização da capacidade máxima de empilhamento deste equipamento.

A possível configuração de um armazém com a empilhadeira bilateral considerando 200 conjuntos e custo padrão do terreno pode ser visto na figura 36.

Figura 33 Leiaute do Armazém para a Empilhadeira Bilateral com 200 conjuntos e custo padrão do terreno

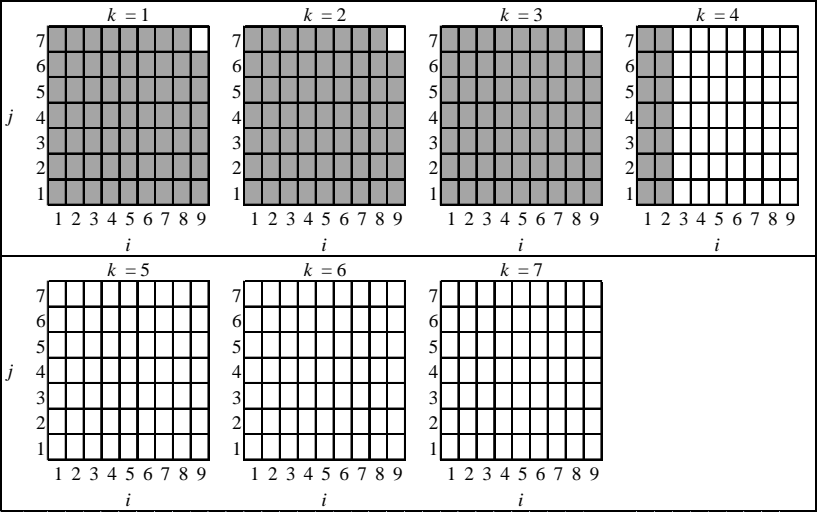


Tabela 53 Percentual de ocupação dos níveis para a Empilhadeira Bilateral

Quantidade de Conjuntos	Nível	Variações no Custo do Terreno				
		-50	-25	0	25	50
200	Nível 1	34,5%	32,0%	31,0%	29,0%	28,0%
	Nível 2	34,5%	32,0%	31,0%	29,0%	28,0%
	Nível 3	31,0%	29,0%	31,0%	29,0%	28,0%
	Nível 4	0,0%	7,0%	7,0%	13,0%	16,0%
	Nível 5	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%
	Nível 6	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%
	Nível 7	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%
500	Nível 1	31,8%	29,0%	29,0%	26,8%	26,8%
	Nível 2	31,8%	29,0%	29,0%	26,8%	26,8%
	Nível 3	29,8%	29,0%	29,0%	26,8%	26,8%
	Nível 4	6,6%	13,0%	13,0%	19,6%	19,6%
	Nível 5	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%
	Nível 6	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%
	Nível 7	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%
1000	Nível 1	28,9%	26,9%	26,9%	25,6%	24,2%
	Nível 2	28,9%	26,9%	26,9%	25,6%	24,2%
	Nível 3	27,5%	26,9%	26,9%	25,6%	24,2%
	Nível 4	14,7%	16,5%	16,5%	19,0%	19,0%
	Nível 5	0,0%	2,8%	2,8%	4,2%	8,4%
	Nível 6	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%
	Nível 7	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%
2000	Nível 1	25,8%	24,9%	24,0%	23,6%	22,7%
	Nível 2	25,8%	24,9%	24,0%	23,6%	22,7%
	Nível 3	24,9%	24,9%	24,0%	23,6%	22,7%
	Nível 4	15,9%	17,7%	18,6%	18,5%	18,5%
	Nível 5	7,6%	7,6%	9,4%	9,8%	10,8%
	Nível 6	0,0%	0,0%	0,0%	0,9%	2,7%
	Nível 7	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%
3000	Nível 1	23,6%	22,9%	22,8%	22,2%	21,5%
	Nível 2	23,6%	22,9%	22,8%	22,2%	21,5%
	Nível 3	23,6%	22,9%	22,8%	22,2%	21,5%
	Nível 4	16,6%	17,3%	17,2%	18,0%	18,7%
	Nível 5	9,5%	10,2%	10,9%	11,0%	11,7%
	Nível 6	2,9%	3,7%	3,7%	4,4%	5,1%
	Nível 7	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%

Por outro lado podem-se observar custos da função objetivo como sendo os mais baixos para as operações simuladas, visto que a combinação de custos de implantação e versatilidade de operação torna este equipamento bem atrativo para a utilização em certas configurações de armazéns (Tabela 54).

Tabela 54 Percentual de ocupação dos níveis para a Empilhadeira Bilateral

Custo F.O.	Quantidade de Posições				
Custo Terreno	200	500	1000	2000	3000
-50	R\$ 1.301.842,70	R\$ 3.474.831,60	R\$ 7.418.634,08	R\$ 16.085.290,35	R\$ 25.495.244,85
-25	R\$ 1.326.913,71	R\$ 3.529.591,26	R\$ 7.520.463,70	R\$ 16.269.587,33	R\$ 25.752.976,75
0	R\$ 1.350.114,84	R\$ 3.582.743,60	R\$ 7.619.070,46	R\$ 16.451.250,72	R\$ 26.004.386,35
25	R\$ 1.371.972,88	R\$ 3.634.655,91	R\$ 7.715.116,93	R\$ 16.626.915,04	R\$ 26.249.168,92
50	R\$ 1.392.845,08	R\$ 3.683.776,01	R\$ 7.808.199,26	R\$ 16.794.106,00	R\$ 26.487.779,17

Ao analisar as diferenças relativas ao custo alvo do terreno (tabela 55), pode-se observar que à medida que aumenta a quantidade de posições utilizadas, diminui esta diferença, demonstrando que o terreno impacta diretamente no custo da operação.

Tabela 55 Variação na Função Objetivo em relação ao custo padrão do terreno

% Variação	Quantidade de Posições				
Custo Terreno	200	500	1000	2000	3000
-50	-3,58%	-3,01%	-2,63%	-2,22%	-1,96%
-25	-1,72%	-1,48%	-1,29%	-1,10%	-0,97%
0	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%
25	1,62%	1,45%	1,26%	1,07%	0,94%
50	3,16%	2,82%	2,48%	2,08%	1,86%
Diferença entre os extremos	6,74%	5,83%	5,11%	4,31%	3,82%

Pode-se observar que em nenhuma das simulações realizadas o nível 7 para foi utilizado. Pode-se concluir que com os custos envolvidos na operação, não é benéfico instalar este ultimo nível. Pode-se esperar que com um aumento muito maior no custo do terreno, talvez este nível seja utilizado.

5.2.6 Resultados e Análise da Simulação para a Empilhadeira Trilateral

A empilhadeira trilateral possui suas características muito similares à empilhadeira bilateral, entretanto, possui seu custo maior de operação devido a sua maior flexibilidade de movimentar o palete sobre três eixos sem manobrar o equipamento. Da mesma forma, este

equipamento também apresenta o maior grau de elevação para verticalização dos paletes, o que também demonstra as variações maiores na ocupação do espaço, conforme demonstra a tabela 56.

Pode-se verificar que o sétimo nível só é exigido em pequena parcela quando utilizado uma grande quantidade de conjuntos (2000 e 3000) e para custos de terreno com acréscimo de 25 e 50% em seu valor alvo.

Esta empilhadeira possui seus custos de deslocamento maior em relação à empilhadeira bilateral. Entretanto, a trilateral possui maior flexibilidade para movimentar o palete sem manobrar o equipamento, o que pode tornar alguns processos mais ou menos produtivos.

A possível configuração de um armazém com a empilhadeira trilateral considerando 200 conjuntos e custo padrão do terreno pode ser visto na figura 37.

Figura 34 Leiaute do Armazém para a Empilhadeira Trilateral com 200 conjuntos e custo padrão do terreno

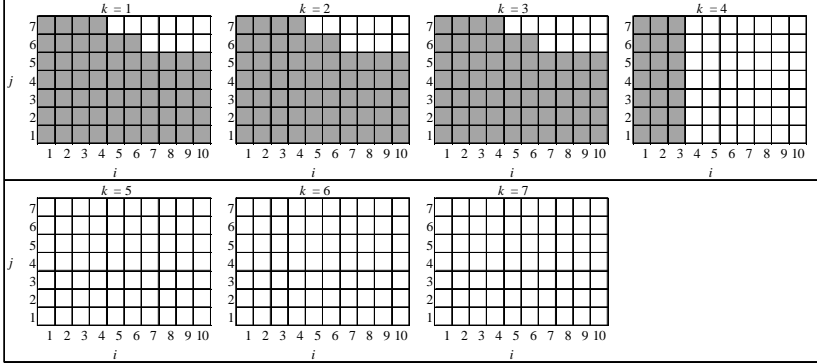


Tabela 56 Percentual de ocupação dos níveis para a Empilhadeira Trilateral

Quantidade de Conjuntos	Nível	Variações no Custo do Terreno				
		-50	-25	0	25	50
200	Nível 1	32,0%	32,0%	30,0%	27,0%	27,0%
	Nível 2	32,0%	32,0%	30,0%	27,0%	27,0%
	Nível 3	32,0%	32,0%	30,0%	27,0%	27,0%
	Nível 4	4,0%	4,0%	10,0%	19,0%	19,0%
	Nível 5	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%
	Nível 6	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%
	Nível 7	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%
500	Nível 1	29,6%	28,2%	27,8%	25,8%	25,8%
	Nível 2	29,6%	28,2%	27,8%	25,8%	25,8%
	Nível 3	27,8%	28,2%	27,8%	25,8%	25,8%
	Nível 4	13,0%	15,4%	16,6%	20,4%	20,4%
	Nível 5	0,0%	0,0%	0,0%	2,2%	2,2%
	Nível 6	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%
	Nível 7	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%
1000	Nível 1	26,5%	26,5%	24,8%	24,4%	23,5%
	Nível 2	26,5%	26,5%	24,8%	24,4%	23,5%
	Nível 3	26,5%	26,5%	24,8%	24,4%	23,5%
	Nível 4	16,0%	16,0%	20,0%	18,4%	21,1%
	Nível 5	4,5%	4,5%	5,6%	8,4%	8,4%
	Nível 6	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%
	Nível 7	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%
2000	Nível 1	26,1%	25,0%	22,5%	22,3%	20,3%
	Nível 2	26,1%	25,0%	22,5%	22,3%	20,3%
	Nível 3	26,1%	25,0%	22,5%	22,3%	20,3%
	Nível 4	15,7%	16,8%	18,3%	18,1%	18,9%
	Nível 5	6,0%	7,0%	11,4%	11,3%	12,9%
	Nível 6	0,0%	1,3%	2,9%	3,8%	6,6%
	Nível 7	0,0%	0,0%	0,0%	0,0%	0,7%
3000	Nível 1	22,6%	21,9%	21,2%	20,9%	20,3%
	Nível 2	22,6%	21,9%	21,2%	20,9%	20,3%
	Nível 3	22,6%	21,9%	21,2%	20,9%	20,3%
	Nível 4	17,0%	17,7%	18,4%	17,6%	18,9%
	Nível 5	10,6%	11,4%	12,8%	12,3%	12,9%
	Nível 6	4,6%	5,4%	5,4%	6,6%	6,6%
	Nível 7	0,0%	0,0%	0,0%	0,7%	0,7%

A tabela 57 apresenta os custos da função objetivo para a empilhadeira trilateral e suas variações de simulação para a quantidade de conjuntos e custo do terreno.

Tabela 57 Percentual de ocupação dos níveis para a Empilhadeira Trilateral

	Quantidade de Posições				
Custo Terreno	200	500	1000	2000	3000
-50	R\$ 1.490.195,87	R\$ 3.983.567,39	R\$ 8.515.467,50	R\$ 18.489.979,17	R\$ 29.321.473,67
-25	R\$ 1.517.409,65	R\$ 4.044.111,03	R\$ 8.628.149,53	R\$ 18.692.958,09	R\$ 29.605.054,34
0	R\$ 1.543.642,07	R\$ 4.103.467,32	R\$ 8.736.629,16	R\$ 18.889.990,68	R\$ 29.883.028,61
25	R\$ 1.568.016,10	R\$ 4.160.470,83	R\$ 8.841.546,48	R\$ 19.079.969,95	R\$ 30.151.267,33
50	R\$ 1.590.977,72	R\$ 4.215.323,59	R\$ 8.941.554,15	R\$ 19.279.050,32	R\$ 30.411.193,73

A tabela 58 apresenta as variações relativas ao custo do terreno alvo e suas variações. Pode-se avaliar que o impacto do custo do terreno também diminui para maiores quantidades. Isto é explicado, pois com maior quantidade de conjuntos, o modelo já utiliza boa parcela da verticalização, o que diminui o impacto do custo do terreno no custo total.

Tabela 58 Variação na Função Objetivo em relação ao custo padrão do terreno

% Variação	Quantidade de Posições				
Custo Terreno	200	500	1000	2000	3000
-50	-3,46%	-2,92%	-2,53%	-2,12%	-1,88%
-25	-1,70%	-1,45%	-1,24%	-1,04%	-0,93%
0	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%	0,00%
25	1,58%	1,39%	1,20%	1,01%	0,90%
50	3,07%	2,73%	2,35%	2,06%	1,77%
Diferença entre os extremos	6,53%	5,65%	4,88%	4,18%	3,65%

Pode-se observar em todas as simulações que existe um ganho real quando é realizado o incremento do custo do terreno, o que torna o armazém mais vertical do que horizontal. Os maiores ganhos foram para os equipamentos que possuem a maior capacidade de elevação em relação ao nível solo, demonstrando que pode ser viável aumentar a verticalização em detrimento do custo do terreno.

5.3 COMPARAÇÃO ENTRE CENÁRIOS ALEATÓRIOS E CENÁRIOS SIMULADOS

É comum que sempre que um gestor inicie o projeto de um armazém, o mesmo escolha o tipo de estrutura de armazenagem e

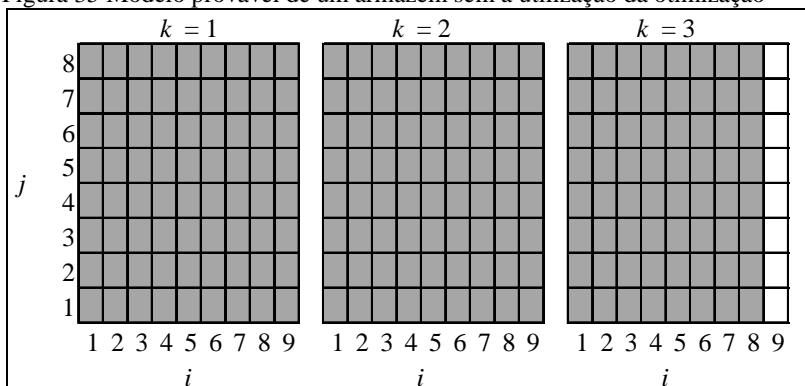
posteriormente escolhe o equipamento de movimentação. A partir destas escolhas, o gestor e fornecedores, tendem a distribuir estas posições em sua capacidade máxima de verticalização e posteriormente realiza um armazém quadrado e ou retangular na sua posição horizontal.

Neste cenário, preferencialmente as empresas optam por dividir todas as posições entre os níveis de forma igual. Como por exemplo, pode-se citar o *Stacker* para 200 conjuntos de armazenagem (600 posições paletes). Provavelmente o leiaute indicado para esta configuração seria assumindo a quantidade de corredores (i) sendo 8 e a quantidade de conjuntos (j) sendo 8. Como a capacidade do equipamento são três níveis, o total ficaria em 192 conjuntos. Sendo 64 em cada nível.

A partir desta premissa, pode-se avaliar através de uma escolha aleatória de leiaute e uma escolha através do modelo apresentado. Para tanto, nos leiautes aleatórios serão necessários realizar algumas adaptações, como no exemplo do *Stacker* pode-se citar: como as simulações foram realizadas com um número de 200 conjuntos, aumenta-se em 1 corredor com 8 posições no primeiro nível, para igualar a quantidade de conjuntos e poder comparar com os resultados obtidos pelo modelo proposto. O modelo de como ficaria um armazém com esta configuração pode ser visto na figura 38.

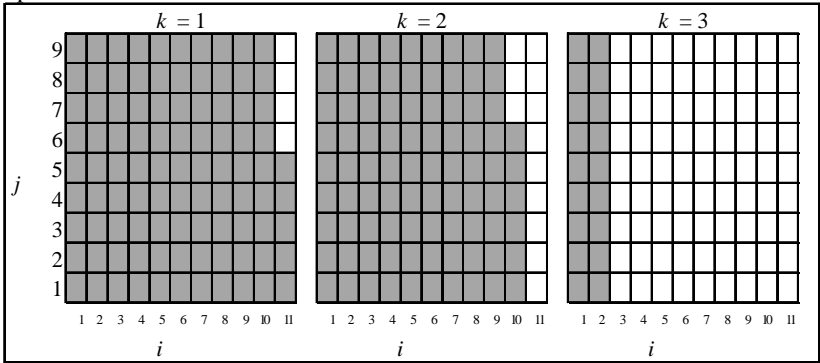
Através desta configuração aleatória detalhada e dos coeficientes da função objetivo que se encontram na planilha eletrônica “Coeficientes FObjetivo.xlsx” no CD-Dados no Apêndice J, pode-se encontrar qual seria o custo esperado desta operação, mantendo-se os padrões de custos e suas variações.

Figura 35 Modelo provável de um armazém sem a utilização da otimização



Para se comparar o modelo proposto no presente trabalho com a configuração aleatória, o modelo proposto, através das simulações realizadas (para o *Stacker* contendo 200 posições e um custo do terreno com decréscimo em 50%) teria um leiaute como o demonstrado na figura 47.

Figura 36 Leiaute aproximado do modelo proposto considerando 200 conjuntos e para o *Stacker*



Neste comparativo, verifica-se que o custo total do modelo aleatório resulta em R\$ 2.292.330,30 e pode ser comparado ao custo total do modelo proposto (R\$ 2.273.183,73). Ao realizar esta comparação, pode-se avaliar uma economia de 0,84% a favor do modelo proposto.

Considerando os dados necessários para este comparativo, foi realizada a simulação aleatória para todas as situações, contendo a variação dos equipamentos de movimentação, a quantidade de conjuntos, bem como a variação no custo do terreno.

As planilhas a qual foram realizadas todas as simulações dos modelos aleatórios e comparadas ao modelo proposto encontram-se no CD-Dados no Apêndice J, na pasta “Simulação Aleatória”. Para facilitar o entendimento, a nomenclatura das planilhas e seus significados constam na tabela 59.

Tabela 59 Nomenclatura dos arquivos na Pasta “Simulação Aleatória”

Nome da Planilha	Equipamento	Descrição
SimStackerAleatório.xlsx	<i>Stacker</i>	Simulação Aleatória
SimEmpGasAleatório.xlsx	Empilhadeira a combustão	Simulação Aleatória
SimEmpEleAleatório.xlsx	Empilhadeira Elétrica	Simulação Aleatória
SimEmpRetAleatório.xlsx	Empilhadeira Retrátil	Simulação Aleatória
SimEmpBiAleatório.xlsx	Empilhadeira Bilateral	Simulação Aleatória
SimEmpTriAleatório.xlsx	Empilhadeira Trilateral	Simulação Aleatória

No interior de cada planilha, existem 7 planos de trabalho sendo que apenas o sétimo plano de trabalho apresenta os resultados. Os significados de cada plano podem ser visto na tabela 60.

Tabela 60 Detalhamento dos planos de trabalho nas planilhas eletrônicas

Plano/ Folha	Descrição
Plano1	Base de dados dos coeficientes da função objetivo
Plano2	Cálculo da Simulação Aleatória para 200 conjuntos
Plano3	Cálculo da Simulação Aleatória para 500 conjuntos
Plano4	Cálculo da Simulação Aleatória para 1000 conjuntos
Plano5	Cálculo da Simulação Aleatória para 2000 conjuntos
Plano6	Cálculo da Simulação Aleatória para 3000 conjuntos
Plano 7	Resultados Comparativos entre a Simulação Aleatória e a Simulação do Modelo

5.3.1 Simulação Aleatória para o *Stacker*

Para que as simulações fossem realizadas um modelo aleatório de leiaute foi criado para cada quantidade de conjuntos simulados pelo modelo. Assim, a tabela 61 demonstra o possível leiaute das simulações aleatórias para o *Stacker*.

Tabela 61 Possíveis leiaute para o modelo aleatório

Configuração Aleatória para a Empilhadeira o <i>Stacker</i>				
Qtd. Posições	<i>i</i>	<i>j</i>	<i>k</i>	Posições Adicionais
200	8,00	8,00	3,00	8,00
500	13,00	13,00	3,00	-7,00
1.000	18,00	19,00	3,00	-26,00
2.000	25,00	27,00	3,00	-25,00
3.000	31,00	32,00	3,00	24,00

Ao se analisar a tabela acima, demonstra-se, por exemplo, que para 200 posições o leiaute terá 8 corredores com 8 conjuntos completos até o terceiro nível, sendo acrescentado 8 posições no corredor 9 para completar a quantidade de conjuntos simulados.

Já no caso do exemplo para 500 posições, o leiaute terá 13 corredores e 13 conjuntos sendo todos com 3 níveis exceto o último corredor e nível que terá subtraído 7 posições para completar a quantidade de 500 posições. Esta regra será adotada para todos os outros conjuntos e ou simulações.

A tabela 62 apresenta os custos comparativos entre a função objetivo obtido através do modelo apresentado neste trabalho e o custo de um armazém construído de forma aleatória.

Tabela 62 Comparativo entre o Modelo Proposto e o Modelo Aleatório para o Stacker.

	Custo do Terreno	Custo do Modelo Aleatório	Função Objetivo (z)	% Variação
200	-50	R\$ 2.292.330,30	R\$ 2.273.183,73	-0,84%
	-25	R\$ 2.331.346,43	R\$ 2.314.500,39	-0,72%
	0	R\$ 2.370.362,56	R\$ 2.353.424,85	-0,71%
	25	R\$ 2.409.378,68	R\$ 2.390.815,30	-0,77%
	50	R\$ 2.448.394,81	R\$ 2.428.205,76	-0,82%
500	-50	R\$ 6.752.505,14	R\$ 6.374.835,91	-5,59%
	-25	R\$ 6.844.084,66	R\$ 6.472.305,86	-5,43%
	0	R\$ 6.935.664,18	R\$ 6.567.136,73	-5,31%
	25	R\$ 7.027.243,70	R\$ 6.661.967,59	-5,20%
	50	R\$ 7.118.823,22	R\$ 6.756.798,45	-5,09%
1000	-50	R\$ 15.409.645,85	R\$ 14.297.026,15	-7,22%
	-25	R\$ 15.594.972,45	R\$ 14.487.771,65	-7,10%
	0	R\$ 15.780.299,05	R\$ 14.678.517,16	-6,98%
	25	R\$ 15.965.625,65	R\$ 14.869.262,67	-6,87%
	50	R\$ 16.150.952,25	R\$ 15.055.543,83	-6,78%
2000	-50	R\$ 34.623.145,70	R\$ 32.952.572,92	-4,83%
	-25	R\$ 34.988.921,88	R\$ 33.327.561,24	-4,75%
	0	R\$ 35.354.698,07	R\$ 33.698.454,49	-4,68%
	25	R\$ 35.720.474,26	R\$ 34.069.107,69	-4,62%
	50	R\$ 36.086.250,44	R\$ 34.439.760,89	-4,56%
3000	-50	R\$ 56.359.236,84	R\$ 54.443.937,09	-3,40%
	-25	R\$ 56.909.797,73	R\$ 55.009.032,57	-3,34%
	0	R\$ 57.460.358,63	R\$ 55.563.418,21	-3,30%
	25	R\$ 58.010.919,52	R\$ 56.111.269,65	-3,27%
	50	R\$ 58.561.480,42	R\$ 56.659.121,09	-3,25%
Total		R\$ 589.506.912,41	R\$ 564.255.531,86	-4,28%

Ao analisar todas as simulações do modelo proposto com o modelo aleatório, pode-se verificar uma economia média de 4,28% em favor do modelo proposto, o que representa uma grande diferença em um processo decisório que afetará a produtividade do armazém.

5.3.2 Simulação Aleatória para a Empilhadeira a Combustão

No caso da Empilhadeira a combustão, o possível leiaute tem uma alteração em relação ao *Stacker* visto que este possui mais um nível de acesso, podendo ser observada suas variações na tabela 63.

Pode-se observar neste modelo que os índices (*i*) e (*j*) possuem uma ligeira redução em relação ao *Stacker* devido ao incremento de um nível em sua capacidade.

Tabela 63 Possíveis leiaute para o modelo aleatório

Configuração Aleatória para a Empilhadeira a Combustão				
Qtd. Posições	<i>i</i>	<i>j</i>	<i>k</i>	Posições Adicionais
200	7,00	7,00	4,00	4,00
500	11,00	11,00	4,00	16,00
1.000	16,00	16,00	4,00	-24,00
2.000	22,00	23,00	4,00	-24,00
3.000	27,00	28,00	4,00	-24,00

A tabela 64 apresentam as variações das simulações realizadas pelo método aleatório e pelo modelo proposto pelo presente trabalho.

Pode-se observar que existe uma média de economia de 1,3% em favor do modelo proposto. Entretanto, observa-se que esta economia tende a ser maior para as 3 maiores simulações (em quantidade de conjuntos), o que os dois armazéns para pequenas quantidades possuem um modelo muito próximo de leiaute.

Tabela 64 Comparativo entre o Modelo Proposto e o Modelo Aleatório para a Empilhadeira a Combustão

	Custo do Terreno	Custo do Modelo Aleatório	Função Objetivo (z)	% Variação
200	-50	R\$ 2.245.553,67	R\$ 2.226.296,93	-0,86%
	-25	R\$ 2.285.919,48	R\$ 2.272.605,44	-0,58%
	0	R\$ 2.326.285,30	R\$ 2.313.145,11	-0,56%
	25	R\$ 2.366.651,11	R\$ 2.351.226,07	-0,65%
	50	R\$ 2.407.016,92	R\$ 2.389.307,02	-0,74%
500	-50	R\$ 5.746.358,30	R\$ 5.683.541,46	-1,09%
	-25	R\$ 5.846.892,02	R\$ 5.792.159,91	-0,94%
	0	R\$ 5.947.425,74	R\$ 5.890.841,51	-0,95%
	25	R\$ 6.047.959,46	R\$ 5.986.043,90	-1,02%
	50	R\$ 6.148.493,18	R\$ 6.081.246,28	-1,09%
1000	-50	R\$ 11.874.665,19	R\$ 11.624.042,92	-2,11%
	-25	R\$ 12.069.639,67	R\$ 11.832.712,97	-1,96%
	0	R\$ 12.264.614,16	R\$ 12.027.862,13	-1,93%
	25	R\$ 12.459.588,64	R\$ 12.218.266,90	-1,94%
	50	R\$ 12.654.563,12	R\$ 12.408.671,66	-1,94%
2000	-50	R\$ 24.316.174,44	R\$ 23.959.677,36	-1,47%
	-25	R\$ 24.701.553,69	R\$ 24.366.697,32	-1,36%
	0	R\$ 25.086.932,94	R\$ 24.754.465,30	-1,33%
	25	R\$ 25.472.312,20	R\$ 25.135.274,84	-1,32%
	50	R\$ 25.857.691,45	R\$ 25.516.084,37	-1,32%
3000	-50	R\$ 37.208.125,74	R\$ 36.749.656,31	-1,23%
	-25	R\$ 37.783.909,76	R\$ 37.353.435,05	-1,14%
	0	R\$ 38.359.693,79	R\$ 37.935.768,09	-1,11%
	25	R\$ 38.935.477,81	R\$ 38.506.982,39	-1,10%
	50	R\$ 39.511.261,83	R\$ 39.078.196,70	-1,10%
Total		R\$ 419.924.759,61	R\$ 414.454.207,94	-1,30%

5.3.3 Simulação Aleatória para a Empilhadeira Elétrica

A Empilhadeira Elétrica possui a mesma configuração de leiaute aleatório que a Empilhadeira a Combustão. Isto se deve ao fato de que ambas possuem a mesma capacidade de elevação. Estas variações podem ser vistas na tabela 63 e os resultados para a simulação aleatória podem ser observadas na tabela 65.

Pode-se observar uma economia média de 2,11% a favor do modelo proposto, entretanto, observa-se que para 1000 e 2000 conjuntos das simulações, este número é maior, o que indica um melhor aproveitamento para estas quantidades.

Tabela 65 Comparativo entre o Modelo Proposto e o Modelo Aleatório para a Empilhadeira Elétrica

	Custo do Terreno	Custo do Modelo Aleatório	Função Objetivo (z)	% Variação
200	-50	R\$ 2.075.343,30	R\$ 2.065.389,58	-0,48%
	-25	R\$ 2.112.671,13	R\$ 2.100.829,60	-0,56%
	0	R\$ 2.149.998,96	R\$ 2.136.044,53	-0,65%
	25	R\$ 2.187.326,78	R\$ 2.171.259,46	-0,73%
	50	R\$ 2.224.654,61	R\$ 2.206.474,39	-0,82%
500	-50	R\$ 5.378.213,07	R\$ 5.307.017,90	-1,32%
	-25	R\$ 5.471.180,48	R\$ 5.396.222,50	-1,37%
	0	R\$ 5.564.147,90	R\$ 5.484.259,82	-1,44%
	25	R\$ 5.657.115,32	R\$ 5.572.297,15	-1,50%
	50	R\$ 5.750.082,73	R\$ 5.660.334,48	-1,56%
1000	-50	R\$ 11.290.270,72	R\$ 10.952.716,47	-2,99%
	-25	R\$ 11.470.571,17	R\$ 11.130.289,06	-2,97%
	0	R\$ 11.650.871,61	R\$ 11.306.363,71	-2,96%
	25	R\$ 11.831.172,06	R\$ 11.482.438,37	-2,95%
	50	R\$ 12.011.472,50	R\$ 11.658.513,02	-2,94%
2000	-50	R\$ 23.385.268,75	R\$ 22.844.008,79	-2,31%
	-25	R\$ 23.741.643,85	R\$ 23.204.609,68	-2,26%
	0	R\$ 24.098.018,94	R\$ 23.557.851,71	-2,24%
	25	R\$ 24.454.394,04	R\$ 23.910.001,02	-2,23%
	50	R\$ 24.810.769,14	R\$ 24.262.150,32	-2,21%
3000	-50	R\$ 36.069.930,01	R\$ 35.350.140,66	-2,00%
	-25	R\$ 36.602.379,76	R\$ 35.888.929,10	-1,95%
	0	R\$ 37.134.829,51	R\$ 36.417.454,47	-1,93%
	25	R\$ 37.667.279,26	R\$ 36.945.678,43	-1,92%
	50	R\$ 38.199.729,02	R\$ 37.473.902,39	-1,90%
Total		R\$ 402.989.334,62	R\$ 394.485.176,62	-2,11%

5.3.4 Simulação Aleatória para a Empilhadeira Retrátil

A Empilhadeira Retrátil possui uma capacidade de elevação superior e pode chegar até o sexto nível de elevação. Assim, foi necessário elaborar os leiautes aleatórios para cada simulação e os mesmos podem ser vistos na tabela 66.

Tabela 66 Possíveis leiaute para o modelo aleatório

Configuração Aleatória para a Empilhadeira Retrátil				
Qtd. Posições	<i>i</i>	<i>j</i>	<i>k</i>	Posições Adicionais
200	6,00	6,00	6,00	-16,00
500	9,00	9,00	6,00	14,00
1.000	13,00	13,00	6,00	-14,00
2.000	18,00	18,00	6,00	56,00
3.000	22,00	23,00	6,00	-36,00

Por sua vez, a tabela 67 apresenta as variações nas simulações aleatórias e do modelo proposto e pode-se observar que esta apresenta um benefício médio de 3,65% de economia a favor do modelo proposto.

Este ganho maior em relação aos outros equipamentos é proveniente da sua maior capacidade de elevação, que para os custos estudados, quase não se ocupa o último nível, ou o mesmo apresenta uma ociosidade muito grande.

Tabela 67 Comparativo entre o Modelo Proposto e o Modelo Aleatório para a Empilhadeira Retrátil

	Custo do Terreno	Custo do Modelo Aleatório	Função Objetivo (z)	% Variação
200	-50	R\$ 1.915.531,83	R\$ 1.848.914,38	-3,48%
	-25	R\$ 1.936.469,72	R\$ 1.880.305,75	-2,90%
	0	R\$ 1.957.407,61	R\$ 1.911.126,88	-2,36%
	25	R\$ 1.978.345,50	R\$ 1.940.207,29	-1,93%
	50	R\$ 1.999.283,39	R\$ 1.967.040,22	-1,61%
500	-50	R\$ 5.006.701,02	R\$ 4.855.974,45	-3,01%
	-25	R\$ 5.059.045,75	R\$ 4.930.138,34	-2,55%
	0	R\$ 5.111.390,47	R\$ 4.999.997,99	-2,18%
	25	R\$ 5.163.735,20	R\$ 5.066.301,30	-1,89%
	50	R\$ 5.216.079,93	R\$ 5.132.384,35	-1,60%
1000	-50	R\$ 10.707.863,16	R\$ 10.214.037,92	-4,61%
	-25	R\$ 10.806.154,92	R\$ 10.350.040,85	-4,22%
	0	R\$ 10.904.446,68	R\$ 10.483.175,02	-3,86%
	25	R\$ 11.002.738,44	R\$ 10.609.463,66	-3,57%
	50	R\$ 11.101.030,21	R\$ 10.728.252,90	-3,36%
2000	-50	R\$ 22.822.495,91	R\$ 21.775.206,77	-4,59%
	-25	R\$ 23.021.405,87	R\$ 22.025.643,73	-4,33%
	0	R\$ 23.220.315,83	R\$ 22.266.504,20	-4,11%
	25	R\$ 23.419.225,79	R\$ 22.495.650,59	-3,94%
	50	R\$ 23.618.135,74	R\$ 22.723.059,35	-3,79%
3000	-50	R\$ 35.519.614,66	R\$ 34.141.127,57	-3,88%
	-25	R\$ 35.813.908,34	R\$ 34.497.071,70	-3,68%
	0	R\$ 36.108.202,02	R\$ 34.844.049,16	-3,50%
	25	R\$ 36.402.495,70	R\$ 35.185.578,41	-3,34%
	50	R\$ 36.696.789,38	R\$ 35.513.558,50	-3,22%
Total		R\$ 386.508.813,08	R\$ 372.384.811,29	-3,65%

5.3.5 Simulação Aleatória para a Empilhadeira Bilateral

As empilhadeiras Bilateral e Trilateral é que possuem a maior capacidade de elevação estudada neste trabalho. Assim, o leiaute aleatório proposto para os dois equipamentos podem ser visto na tabela 68.

Tabela 68 Possíveis leiaute para o modelo aleatório

Configuração Aleatória para a Empilhadeira Bilateral				
Qtd. Posições	i	j	k	Posições Adicionais
200	5,00	6,00	7,00	-10,00
500	8,00	9,00	7,00	-4,00
1.000	11,00	13,00	7,00	-1,00
2.000	16,00	18,00	7,00	-16,00
3.000	20,00	21,00	7,00	60,00

Os custos relativos às simulações para a Empilhadeira Bilateral pode ser observado na tabela 69. Pode-se observar que o ganho médio chega a 7,48% a favor do modelo proposto neste trabalho. Observa-se ainda que para as menores quantidades de conjuntos simulados (até 500 conjuntos), observa-se um ganho maior, visto que a elevação para estes casos se torna muito mais onerosa.

Tabela 69 Comparativo entre o Modelo Proposto e o Modelo Aleatório para a Empilhadeira Bilateral

	Custo do Terreno	Custo do Modelo Aleatório	Função Objetivo (z)	% Variação
200	-50	R\$ 1.469.203,07	R\$ 1.301.842,70	-11,39%
	-25	R\$ 1.480.200,10	R\$ 1.326.913,71	-10,36%
	0	R\$ 1.491.197,14	R\$ 1.350.114,84	-9,46%
	25	R\$ 1.502.194,18	R\$ 1.371.972,88	-8,67%
	50	R\$ 1.513.191,21	R\$ 1.392.845,08	-7,95%
500	-50	R\$ 3.858.944,85	R\$ 3.474.831,60	-9,95%
	-25	R\$ 3.885.337,74	R\$ 3.529.591,26	-9,16%
	0	R\$ 3.911.730,63	R\$ 3.582.743,60	-8,41%
	25	R\$ 3.938.123,52	R\$ 3.634.655,91	-7,71%
	50	R\$ 3.964.516,40	R\$ 3.683.776,01	-7,08%
1000	-50	R\$ 8.301.240,77	R\$ 7.418.634,08	-10,63%
	-25	R\$ 8.353.659,97	R\$ 7.520.463,70	-9,97%
	0	R\$ 8.406.079,18	R\$ 7.619.070,46	-9,36%
	25	R\$ 8.458.498,39	R\$ 7.715.116,93	-8,79%
	50	R\$ 8.510.917,59	R\$ 7.808.199,26	-8,26%
2000	-50	R\$ 17.686.972,54	R\$ 16.085.290,35	-9,06%
	-25	R\$ 17.792.544,09	R\$ 16.269.587,33	-8,56%
	0	R\$ 17.898.115,64	R\$ 16.451.250,72	-8,08%
	25	R\$ 18.003.687,19	R\$ 16.626.915,04	-7,65%
	50	R\$ 18.109.258,74	R\$ 16.794.106,00	-7,26%
3000	-50	R\$ 27.404.177,44	R\$ 25.495.244,85	-6,97%
	-25	R\$ 27.565.833,87	R\$ 25.752.976,75	-6,58%
	0	R\$ 27.727.490,31	R\$ 26.004.386,35	-6,21%
	25	R\$ 27.889.146,74	R\$ 26.249.168,92	-5,88%
	50	R\$ 28.050.803,18	R\$ 26.487.779,17	-5,57%
Total		R\$ 297.173.064,46	R\$ 274.947.477,50	-7,48%

Ao se observar também as simulações considerando uma mesma quantidade de conjuntos, entretanto variando o custo do terreno, como por exemplo, para 1.000 conjuntos, pode-se verificar que o ganho é ainda maior para os custos do terreno menor, indicando que o modelo proposto tende a horizontalizar e o modelo aleatório tende a verticalizar tal condição.

5.3.6 Simulação Aleatória para a Empilhadeira Trilateral

Como dito anteriormente, a tabela 68 apresenta os possíveis leiautes aleatórios para a Empilhadeira Trilateral. Os seus comparativos de custos nas simulações podem ser verificadas na tabela 70 e observa-se que o ganho médio pode chegar em 6,64% a favor do modelo proposto. O que ressalta também que este equipamento, considerando todos os custos aplicados, os últimos níveis não seriam utilizados.

Tabela 70 Comparativo entre o Modelo Proposto e o Modelo Aleatório para a Empilhadeira Trilateral

	Custo do Terreno	Custo do Modelo Aleatório	Função Objetivo (z)	% Variação
200	-50	R\$ 1.654.435,06	R\$ 1.490.195,87	-9,93%
	-25	R\$ 1.665.432,10	R\$ 1.517.409,65	-8,89%
	0	R\$ 1.676.429,13	R\$ 1.543.642,07	-7,92%
	25	R\$ 1.687.426,17	R\$ 1.568.016,10	-7,08%
	50	R\$ 1.698.423,20	R\$ 1.590.977,72	-6,33%
500	-50	R\$ 4.354.144,99	R\$ 3.983.567,39	-8,51%
	-25	R\$ 4.380.537,87	R\$ 4.044.111,03	-7,68%
	0	R\$ 4.406.930,76	R\$ 4.103.467,32	-6,89%
	25	R\$ 4.433.323,65	R\$ 4.160.470,83	-6,15%
	50	R\$ 4.459.716,54	R\$ 4.215.323,59	-5,48%
1000	-50	R\$ 9.427.844,62	R\$ 8.515.467,50	-9,68%
	-25	R\$ 9.480.263,83	R\$ 8.628.149,53	-8,99%
	0	R\$ 9.532.683,04	R\$ 8.736.629,16	-8,35%
	25	R\$ 9.585.102,24	R\$ 8.841.546,48	-7,76%
	50	R\$ 9.637.521,45	R\$ 8.941.554,15	-7,22%
2000	-50	R\$ 20.174.030,71	R\$ 18.489.979,17	-8,35%
	-25	R\$ 20.279.602,26	R\$ 18.692.958,09	-7,82%
	0	R\$ 20.385.173,80	R\$ 18.889.990,68	-7,33%
	25	R\$ 20.490.745,35	R\$ 19.079.969,95	-6,88%
	50	R\$ 20.596.316,90	R\$ 19.279.050,32	-6,40%
3000	-50	R\$ 31.306.286,94	R\$ 29.321.473,67	-6,34%
	-25	R\$ 31.467.943,37	R\$ 29.605.054,34	-5,92%
	0	R\$ 31.629.599,81	R\$ 29.883.028,61	-5,52%
	25	R\$ 31.791.256,24	R\$ 30.151.267,33	-5,16%
	50	R\$ 31.952.912,68	R\$ 30.411.193,73	-4,82%
	Total	R\$ 338.154.082,71	R\$ 315.684.494,28	-6,64%

5.3.7 Análise dos Resultados

Pode ser observado através das simulações para todos os equipamentos, que o modelo proposto apresenta melhor distribuição das posições de armazenagem, resultando em economia no projeto todo. Vale ressaltar, que quanto maior a capacidade do equipamento, maior a economia em relação aos modelos aleatórios aplicados. O que demonstra a validade do modelo e sua importância para os projetos de futuros armazéns.

A decisão entre verticalizar e horizontalizar um armazém, talvez seja a maior decisão de um gestor quando da construção e ou readequação de um armazém. Outros pontos são importantes, como por exemplo: escolha do sistema de armazenagem, escolha do equipamento de movimentação, áreas de *picking*, áreas externas, entre outros. No tocante a verticalização e ou horizontalização, o modelo apresentado demonstrou que existe um impacto entre os custos envolvidos e o método de construção do leiaute.

Pode-se observar que em todas as simulações através do modelo proposto, à medida que os custos do terreno ficam maiores, a tendência do modelo é de verticalizar a estrutura e quando estes custos diminuem, a tendência é manter a estrutura mais horizontal.

Nas simulações realizadas com o *Stacker*, por exemplo, pode ser observado que o modelo apresentou variações no leiaute da estrutura quando da alteração dos custos do terreno para até 500 conjuntos (1.500 posições paletes) e a partir de 1.000 conjuntos esta mudança no leiaute quase não teve efeito. Isto pode ser atribuído à limitação de altitude do equipamento, portanto, para estas condições simuladas, pode-se observar que este equipamento é indicado para até 1.500 posições paletes.

Por outro lado, a Empilhadeira a Combustão apresentou variações significativas no leiaute para até 1.000 conjuntos (3.000 posições paletes). Entretanto, estas variações significativas ficaram sempre ocorrendo quando a simulação utilizou-se dos custos do terreno abaixo do custo alvo. Isto ocorreu devido ao custo alvo do terreno somado aos custos de operação e construção, já ocuparem quase a totalidade dos níveis alcançados pelo equipamento, prevalecendo com que as variações ocorressem apenas para os menores valores de custo do terreno.

A Empilhadeira Elétrica foi a que apresentou a menor variação no leiaute durante as simulações. As variações ocorreram apenas quando os custos do terreno ficaram 50% abaixo do custo alvo. Esta menor sensibilidade quanto ao custo do terreno, deve-se ao fato de que os

custos de operação e aquisição da Empilhadeira Elétrica são maiores com relação aos da Empilhadeira à Combustão, fazendo com que as variações no custo do terreno tenham menor impacto nas simulações realizadas independente da quantidade de conjuntos avaliado.

Entretanto, foi nos equipamentos de maior capacidade de elevação que estas modificações no leiaute apresentaram variações expressivas. Neste contexto estão inseridas a Empilhadeira Retrátil, a Empilhadeira Bilateral e a Empilhadeira Trilateral, que apresentaram variações em todas as simulações realizadas. Estas variações apresentaram a inclusão e ou exclusão de um nível ou mais dependendo das combinações entre custo de terreno e quantidade de conjuntos simulados.

Pode-se verificar também que para os equipamentos de maior capacidade, quase não foram utilizados o ultimo nível de armazenagem, indicando que para os custos envolvidos nesta análise, o gestor não deve considerar a capacidade máxima do equipamento de movimentação como base para a construção do armazém.

Esta análise pode ser confirmada quando comparados os resultados das simulações através do modelo e as simulações de um leiaute arbitrário, que normalmente permeiam as decisões dos gestores.

Os equipamentos que apresentaram maior economia são as Empilhadeiras Bilateral e Trilateral, que obtiveram 7,48 e 6,64%, respectivamente, de economia quando comparados o modelo apresentado neste trabalho e o modelo aleatório. Entretanto, todos os equipamentos apresentaram variações significativas de economia quando utilizados o modelo proposto em detrimento de um modelo arbitrário de leiaute.

Entretanto, pode-se avaliar que o modelo apresentou melhores resultados para os equipamentos que ocupam maior área de solo (*Stacker*, Empilhadeira a Combustão e Empilhadeira Elétrica) para as simulações até 3.000 posições paletes e os demais equipamentos (Empilhadeira Retrátil, Empilhadeira Bilateral e Empilhadeira Trilateral), para as simulações acima de 3.000 posições paletes.

Todavia, a decisão entre verticalizar e ou horizontalizar os armazéns vai além das restrições propostas pelo modelo, por isso, nesta decisão sempre cabe uma análise gerencial que deve ser tomada com maior quantidade de informações e indicações dos parceiros e fornecedores.

6 CONCLUSÃO

Diante da pesquisa realizada, pode-se concluir que, há uma ampla gama de estudos referente ao leiaute na armazenagem, porém poucas pesquisas (dentre as estudadas) referem-se ao design do leiaute na armazenagem. Em sua grande maioria, os pesquisadores desenvolvem seus trabalhos com o objetivo de encontrar a melhor alocação dos itens em estruturas existentes através do volume de movimentação e/ou políticas de *picking*. No que se referem ao design do leiaute, as pesquisas limitam-se a dispor as estruturas no plano do armazém para posterior estudo da alocação dos produtos, sem propor uma solução entre verticalizar e ou horizontalizar tais estruturas para uma possível melhora da produtividade.

Para tanto, o presente trabalho apresentou um modelo matemático baseado em custos que auxilia os gestores a tomarem decisões em seus projetos de armazéns, indicando o possível leiaute para cada um dos equipamentos simulados, atendendo assim o objetivo geral desta tese.

O atendimento ao primeiro objetivo específico desta tese pode ser observado na seção 3.8 que apresenta uma programação linear binária. Para esta programação, foi inserida uma variável contendo três índices de identificação, permitindo identificar cada uma das posições de armazenagem. Cada um destes índices refere-se a sua posição dentro do armazém em relação ao corredor, conjunto e nível. Este modelo foi baseado na pesquisa de Zhang & Lai (2006) que propuseram um modelo similar para alocar os itens em um armazém com mais de um nível de altura. Entretanto, o modelo apresentado por Zhang & Lai (2006) apenas alocam os produtos em uma estrutura pré-existente, diferentemente do modelo deste trabalho que indica qual será a disposição destas estruturas.

Por sua vez, os métodos de custeio para cada uma das variáveis que impactam a construção e operação dos armazéns, que é o segundo objetivo específico deste trabalho, podem ser vistos na seção 3.9, na qual se utilizou o modelo de Goetschalckx *et. al.* (2002) como base para o desmembramento dos custos envolvidos. O modelo aplicado dividiu os custos em custos de abertura do armazém e custos de operação. Na avaliação dos custos totais da função objetivo, pode-se afirmar que estes se referem a todo o custo envolvido de uma operação dentro do horizonte de tempo estudado.

Para conseguir realizar os desmembramentos dos custos operacionais e de construção envolvidos, foi necessário desenvolver uma metodologia de levantamento e cálculo dos parâmetros de operação

e construção dos armazéns. As seções 3.4, 3.5, 3.6 e 3.7 demonstram esta metodologia desenvolvida a partir da pesquisa de Öñüt *et. al.* (2008) como base teórica.

Por fim, o capítulo 5 apresenta o atendimento aos três últimos objetivos específicos que é a simulação em cenários distintos, a análise dos custos totais de operação e a análise das simulações realizadas.

Observou-se que o modelo é muito sensível em relação às mudanças de custo do terreno, pois quando estes valores são alterados, existiu um impacto direto na verticalização do armazém. Em outras palavras, o modelo demonstrou que ao elevar o custo do terreno, tende-se a verticalizar o armazém, e vice-versa. Nas simulações realizadas, pode-se observar um ganho de até sete pontos percentuais quando avaliado uma mesma simulação (equipamento e quantidade de conjuntos), apenas quando se altera o custo do terreno. Este ganho também se refere ao custo de operação.

Outro fato que pode ser observado, é que para as simulações com menor quantidade de conjuntos os ganhos em pontos percentuais foram maiores (como por exemplo, pode ser visto a tabela 43). Isto demonstra que, quando há um grande incremento no custo do terreno, o modelo verticaliza ao máximo o leiaute do armazém. Entretanto, para as simulações contendo maior quantidade de conjuntos (exemplo: 1000, 2000 e 3000) estes já acabam ocupando os maiores níveis de altura devido ao seu grande volume.

Pode-se afirmar ainda que, o modelo apresentou ganhos satisfatórios com relação ao leiaute arbitrário proposto na seção 5.3, chegando a apresentar mais de 7% de economia na operação global, dependendo do caso. Este leiaute arbitrário é o que normalmente se encontra nos armazéns construídos. Neste caso, o formato padrão, quadrado e ou de simetrias próximas. Neste caso, o modelo comprova que nem sempre o leiaute padrão é o que retornará o melhor resultado.

Por outro lado, nos equipamentos de menor capacidade os ganhos com a economia do modelo em relação aos leiautes arbitrário possuem menor impacto, o que demonstra que para os custos de operação existentes a verticalização máxima já é alcançada independente dos custos de terreno envolvidos.

Dessa forma, pode-se concluir que este trabalho apresentou um modelo simples e de fácil aplicabilidade em diversas situações, evidentemente com limitações. Prestando-se ao auxílio de gestores em tomadas de decisões quanto a verticalizar e/ou horizontalizar o armazém, fornecendo-lhes subsídios para que se tenha o menor custo de construção e operação do armazém.

Como sugestões para trabalhos futuros, indica-se a possibilidade de inserir uma política de *picking* dentro do modelo para validar qual seria o efeito nesta verticalização, podendo avaliar assim a possibilidade de verticalizar mais as estruturas próximo às docas de entrada e saída e horizontalizar as estruturas para os produtos que possuem menor grau de giro. Outra sugestão é de considerar nos custos envolvidos a possibilidade de relaxar as restrições das equações 63 a 66 do modelo, permitindo que as estruturas de armazenagem não tenham estas restrições de nível e de quantidade de conjuntos por corredor. Para tanto, será necessário apurar melhor os custos de construção, tendo em vista que o armazém teria um formato muito irregular.

Por fim, como ultima sugestão, elaborar uma automação deste modelo, através da tecnologia da informação, para facilitar a utilização do mesmo por gestores e usuários que não possuem conhecimento na área da modelagem matemática, permitindo assim uma maior aplicabilidade cotidiana do modelo para o incremento da produtividade das empresas relacionadas.

REFERÊNCIAS

- AGUIA. **Site da empresa Águia Sistemas de Armazenagem.** Conteúdo encontrado em <http://www.aguiasistemas.com.br>, em 12/02/2010 as 22:10.
- ALPHATEC. **Site da empresa Alphatec.** Conteúdo encontrado em www.alphateccranes.com.br, em 27/02/2011 as 21:20.
- ASHAYEN, J.; REUTS, R.; TAMMEL, B. A modified simple heuristic for the p-median problems with facilities design applications. **Robotics and Computer Integrated Manufacturing**. Vol 21 (4-5), pp. 451-464, 2005.
- ASHAYERI, J.; GELDERS, L.F. Warehouse design optimization. **European Journal of Operational Research**. Vol 21. pp 285-294. 1985.
- BAKER, P.; CANESSA, M. Warehouse design: A structured approach. **European Journal of Operational Research**; vol 193; pp. 425-436. 2009.
- BALLOU, Ronald H. **Gerenciamento da cadeia de suprimentos: planejamento, organização e logística empresarial**. 4. ed. Porto Alegre: Bookman, 2001.
- BALLOU, Ronald H. **Logística Empresarial**. Editora Atlas, 1ª edição. São Paulo. 1993.
- BANZATO, Eduardo et. al. **Atualidades na Armazenagem**. IMAM, 1ª edição. São Paulo. 2003.
- BASILE, F.; CHIACCHIO, P.; GROSSO, D. Del. A control oriented model for manual-pick warehouses. **Control Engineering Practice** 20; pp. 1426–1437 2012.
- BERTRAND, J. W. M.; FRANZOO, J. C. Modelling and simulation: operations management research methodologies using quantitative modeling. **International Journal of Operations & Production Management**, v. 22, n. 2, p. 241-264, 2002.

BHASKARAN, K.; MALMBORG, C. J. Modelling the service process in a multi-address warehouse system. **Appl. Math. Modelling**, Vol 13, 1989.

BICKCHIN, Y.; KHMELNITSKY, E.; YAKUEL, P. Optimizing a dynamic order-picking process. **European Journal of Operational Research**. Vol 219. Pp 335-346. 2012.

BOWERSOX, D. J.; CLOSS, D. J. **Logística empresarial: o processo de integração da cadeia de suprimento**. São Paulo: Atlas, 2001.

BOWERSOX, D. J.; CLOSS, D. J.; COOPER, M. B. **Gestão logística de cadeias de suprimentos**. Porto Alegre: Bookman, 2007.

BROWN, S. Innovation and evolution in UK retailing: the retail warehouse, **European Journal of Marketing**, Vol. 24 No. 9, pp. 39-54. 1990.

BRYMAN, A. **Research methods and organization studies** (contemporary social research). 1st edition, London: Routledge, 1989.

CANEN, Alberto G. WILLIAMSON, Geoff H. **Facility layout overview: towards competitive advantage**, Facilities, Vol. 14 Iss: 10 pp. 5 – 10. 1996.

CHAN, F. T.S.; CHAN, H.K. Improving the productivity of order picking of a manual-pick and multi-level rack distribution warehouse through the implementation of clas-based storage. **Expert Systems with Applications**, vol 38, pp 2686-2700. 2011.

CHANG, D-T.; WEN, U-P. The impact on rack configuration on the speed profile of storage and retrieval machine. **IIE Transactions**. Vol 29, pp. 525–531. 1997.

CHIEN, Te-K. An empirical study of facility layout using a modified SLP procedure, **Journal of Manufacturing Technology Management**, Vol. 15 Iss: 6 pp. 455 – 465. 2004.

CHOPRA, S.; MEINDL, P.. **Gerenciamento da cadeia de suprimentos: estratégia, planejamento e operação**. 1. ed. São Paulo: Prentice Hall do Brasil, 2004.

CHUNG, C. A. **Simulation modeling handbook: a practical approach**. Florida: CRC Press, 2004.

CONNOLLY, C. Warehouse management technologies, **Sensor Review**, Vol. 28 Iss: 2 pp. 108 – 114. 2008

CORLEY, H. W.; ROBERTS, S. D. A partitioning problem with applications in regional design, **Operational Research**, vol 20 (5), pp. 1010-1019, 1972.

DAI, J. B.; LEE, N. K.S. Economic feasibility analysis of flexible material handling systems: A case study in the apparel industry. **International Journal Productions Economics**, Vol 136, pp. 28-36. 2012.

De KOSTER, R. B.M. **Warehouse Math**. This paper has been published in L. Kroon, T. L. R. Zuidwijk (eds.), *Liber amicorum*., 179-186, Dinalog Breda, 2010.

DESHPANDE, P. J.; YALCIN, A.; ZAYAS-CASTRO, J.; HERRERA, L. E. Simulating less-than-truckload terminal operations, **Benchmarking: An International Journal**, Vol. 14 Iss: 1 pp. 92 – 101. 2007.

DONATH, B.; MAZEL, J.; DUBIN, C.; PATTERSON, P.. **The IOMA Handbook of Logistics and Inventory Management**. 3^a ed. John Wiley & Son, New York, 2002.

DUNKER, T. RADONS, G. WESTKÄMPER, E. Combining evolutionary computation and dynamic programming for solving a dynamic facility layout problem. **European Journal of Operational Research**, 165, 55–69. 2005.

FABER, N.; KOSTER, R. B.M. de; VAN DE VELDE, S. L. Linking warehouse complexity to warehouse planning and control structure: An exploratory study of the use of warehouse management information systems, **International Journal of Physical Distribution & Logistics Management**, Vol. 32 Iss: 5 pp. 381 – 395. 2002.

FLEURY, P. F.; RIBEIRO, A. F. M. **Logística e gerenciamento da cadeia de suprimentos: planejamento do fluxo e dos recursos**. São Paulo: Atlas, 2003.

GERALDES, C. A.S.; CARVALHO, M. S.; PEREIRA, G. A. B. Simulation in the warehouse design and management context: A survey. **ESM**; pp 275-280. 2011.

GOETSCHALCKX, M. MCGINNIS, L. BODNER, D. GOVINDARAJ, T. SHARP, G. HUANG, K. A systematic design procedure for small parts warehousing systems using modular drawer and bin shelving systems. **IMHRC - International Material Handling Research Colloquium**, 2002.

GOETSCHALCKX, M.; RATLIFF, D. Shared storage policies based on the duration stay of unit loads. **Management Science**, Vol 16 (9), pp. 1120-1132, 1990.

GONG, Y. DE KOSTER, R. B. M. A review on stochastic models and analysis of warehouse operations. **Logistic Research**, vol 3, pp. 191–205, 2011.

GONG, Y.; DE KOSTER, M. B. M. Approximate optimal order batch sizes in a parallel-aisle warehouse. In: Bertazzi L, Grazia Esperanza M, Nunen JAE (eds) **Lecture notes in economics and mathematical systems**, vol 619, pp 175–194. 2009.

GU, J.; GOETSCHALCKX, M.; MCGINNIS, L. F. Research on warehouse design and performance evaluation: A comprehensive review. **European Journal of Operational Research**, vol 203. Pp. 539-549. 2010.

GUE, K. R.; IVANOVIC, G.; MELLER, R. D. A unit-load warehouse with multiple pickup and deposit points and non-traditional aisles. **Transportation Research**. Part E. Vol 48, pp. 795-806. 2012.

GUE, K. R.; MELLER, R. D. Aisle configurations for unit-load warehouses. **IEE Transactions**, vol 41, pp. 171-182. 2009.

GUE, K. R.; MELLER, R. D.; SKUFCA, J. D. The effects of pick density on order picking areas with narrow aisles. **IEE Transactions**. Vol 38, pp. 859–868. 2006.

HAN, C.; DAMRONGWONGSIRI, M.. Stochastic modeling of a two-echelon multiple sourcing supply chain system with genetic algorithm,

Journal of Manufacturing Technology Management, Vol. 16 Iss: 1 pp. 87 – 108. 2005.

HARILA, M.; SEPPÄNEN, M.; SUOMALA, P. Detailed cost modelling: a case study in warehouse logistics, **International Journal of Physical Distribution & Logistics Management**, Vol. 37 Iss: 3 pp. 184 – 200. 2007.

HASSAN, M M.D.; A framework for the design of warehouse layout, **Facilities**, Vol. 20 Iss: 13; pp. 432 – 440. 2002.

HENN, S.; WÄSCHER, G.. Tabu search heuristics for the order batching problem in manual order picking systems. **European Journal of Operational Research**. Vol 222. pp 484-494. 2012.

HENNEBERRY, J.M. Occupiers and their use of accommodation on science parks and high technology developments, **Journal of Property Research**, Vol. 4 No. 2, pp. 109-44. 1987.

HERAGU, S; SRINIVASAN, M. Analysis of manufacturing systems via single-class, semi-open queuing networks. **International Journal of Production Research**. Vol. 49 (2), pp. 2011.

HERAGU, S. S. KUSIAK, A.. Efficient models for the facility layout problem. **European Journal of Operational Research**. Vol 53, pp 1-13. 1991.

HODGSON, T. J.; LOWE, T. J. Production lot sizing and material handling cost considerations, **IIE Trans**. 14, 44-51. 1982.

HOU, J.- L.; WU; Y.-J.; YANG, Y.-J. A model for storage arrangement and re-allocation for storage management operations. **International Journal of Computer Integrated Manufacturing**; Vol. 23, No. 4, 369–390. 2010.

HSIEH, L. F. TSAI, L. The Optimum Design a Warehouse System on Order Picking Efficiency. **International Journal Of Manufacturing Technology**, 28, 626-637. 2006

HUERTAS, J. I.; RAMIREZ, J. D.; SALAZAR, F. T. Layout evaluation of large capacity warehouse. **Facilities**, Vol 25 (7/8), pp. 259-270. 2007.

HUQ, F.; CUTRIGHT, K.; JONES, V.; HENSLER, D. A. Simulation study of a two-level warehouse inventory replenishment system, **International Journal of Physical Distribution & Logistics Management**, Vol. 36 Iss: 1 pp. 51 – 65. 2006.

HWANG, H. LEE, M. Order batching algorithms for a man-on-board automated storage and retrieval system. **Engineering Costs and Production Economics**, Vol 13. pp. 285-295. 1988.

HWANG, H. SONG, J. Y. Sequencing picking operations and travel time models for man-on-board storage and retrieval warehousing system. **International Journal of Production Economics**. Vol 29. pp. 75-88. 1993.

KAIYOU, L.; YUBUI, Q. A study constrained layout optimization using adaptive particle swarm optimizer. **Journal of Computer Research and Development**. Vol 10. 2006.

KALLINA, C.; LYNN, J. Application of the cube-per-order index rule for stock location in a distribution warehouse, **Interfaces**, vol. 7, pp. 37-45. 1976.

KOTHARI, Ravi; GHOSH, Diptesh. Tabu search for the single row facility layout problem using exhaustive 2-opt and insertion neighborhoods. **European Journal of Operational Research**. Vol 224. pp. 93-100. 2013.

KUN, Z.; HUI, L, KUNLEI, L. Optimeized bee colony algorithm in reasonable layout of warehouse of transit network. **Modern Urban Transport**. Vol 1. 2011.

LAI, K. K.; XUE, J.; ZHANG, G. Layout design for a paper reel warehouse: A two stage heuristic approach. **International Journal of Productions Economics**. Vol 75, n. 3, pp. 231-243, 2002.

LAM, C. H.Y.; CHOY, K.L.; CHUNG; S.H. A decision support system to facilitate warehouse order fulfillment in cross-border supply chain, **Journal of Manufacturing Technology Management**, Vol. 22 Iss: 8 pp. 972 – 983. 2011.

- LARSON, T. N.; MARCH, H.; KUSIAK, A. A heuristic approach to warehouse layout with class based storage. **IEEE Transactions**. Vol 29 (4), pp. 337-348. 1997.
- LERHER, T. POTRC, I. SRAML, M. SEVER, D. A modeling approach and support tool for designing automated warehouses. **Advanced Engineering**, 1st year, Vol 1. pp. 39 – 54. 2007.
- LIMA, M. P. **Custos Logísticos na Economia Brasileira**. Revista Tecnológica. Ed: 01. 2006.
- LINDLEY, J.T.; TOPPING, S.; LINDLEY, L.T. The hidden financial costs of ERP software, **Managerial Finance**, Vol. 34 No. 2, pp. 78-90. 2008.
- LIU, C-M. Optimal Storage Layout and Order Picking for Warehousing. **International Journal of Operations Research** Vol. 1, No. 1, 37–46, 2004.
- MALMBORG, C. J.; BHASKARAN, K. A revised proof of optimality for cube-per-order ubdex rule for stored item location. **Applied Mathematical Modelling**, 14, 87-95. 1990.
- MALMBORG, C. J.; BALACHANDRAN, S.; KYLE, D. M. A model based evaluation of a commonly used rule of thumb for warehouse layout. **Appl. Math. Modelling**, Vol. 10, 1986.
- MATIC, D.; KRATICA, J.; FILIPOVIC, V.; DUGOSIJA, D. Variable neighborhood search for multiple level warehouse layout problem. **Electronic Notes in Discrete Mathematics**; vol 39; pp. 161-168. 2012.
- MATSON, J. O. WITH, J. A. Operational research and material handling. **European Journal of operational Research**, vol 11, pp. 309-318. 1982.
- MCKENDALL JR., A. R. Improved Tabu search heuristics for the dynamic space allocation problem. **Computers & Operations Research**, Vol 35 pp. 3347–3359, 2008.

MECALUX. **Site da empresa Mecalux Soluções de Armazenagem.** Conteúdo encontrado em <http://www.mecalux.com.br/>, em 17/02/2011 as 16:50.

MOLNÁR, B., LIPOVSZK, G. Multi-Objective Routing And Scheduling Of Order Pickers In A Warehouse. **International Journal of Simulation**, Vol. 6, No. 5. pp. 22-32. 2008.

MONTREUIL, B.; RATLIFF, D. Utilizing cut trees as design skeletons for facility layout, **IIE Transactions**, Vol 21, n.2, pp. 136-143, 1989.

MOURA, C. E. **Gestão de Estoques.** Editora Ciência Moderna, 1ª edição. Rio de Janeiro. 2004.

MUPPANI, V.R.; ADIL, G.K. **A branch and bound algorithm for class based storage assignment.** European Journal of Operational Research. Vol 189, pp. 492–507. 2008.

MUPPANI, V.R.; ADIL, G.K. Formation of storage classes in the presence of space cost for warehousing planning. **International Journal of Service Operations and Informatics**. Vol 1 (3), pp. 286-303, 2006.

NOVAES, A. G. **Sistemas Logísticos: Transporte, Armazenagem e Distribuição Física de Produtos.** São Paulo: Edgard Blucher, 1989.

ÖNÜT, S.; TUZKAYA, U. R.; DOGAÇ, B.. A particle swarm optimization algorithm for the multiple-level warehouse layout design problem. **Computers & Industrial Engineering**, Vol 54, pp. 783-799, 2008.

PAN, Jason Chao-Hsien; WU, Ming-Hung. Throughput analysis for order picking system with multiple pickers and aisle congestion considerations. **Computers & Operations Research**, vol 39; pp 1661-1672. 2012.

PANDITT, R.; PALEKAR, U. S. Response time considerations for optimal warehouse layout design. **Journal of Engineering for Industry**. Vol 115 (3), pp. 322-328. 1993.

PETERSEN II, C. G. An evaluation of order picking routeing policies, **International Journal of Operations & Production Management**, Vol. 17 Iss: 11 pp. 1098 – 1111. 1997.

PETERSEN II, C. G. The impact of routing and storage policies on warehouse efficiency, **International Journal of Operations & Production Management**, Vol. 19 Iss: 10 pp. 1053 – 1064. 1999.

PETERSEN, C.G.; SIU, C.; HEISER, D. R. Improving order picking performance utilizing slotting and golden zone storage, **International Journal of Operations & Production Management**, Vol. 25 Iss: 10 pp. 997 – 1012. 2005.

PETERSEN, C.; SCHMENNER, R. An evaluation of routing and volume based storage policies in a order picking operation. **Decision Sciences**. Vol 30 (2), pp. 481-501. 1999.

POHL, L.; MELLER, R.; GUE, K. An analysis of dual command operations in common warehouse designs. **Transportations Research Part E. Logistics and Transportations Review**. Vol 45 (3), pp. 367-379. 2009.

POWER, D.; SHARAFALI, M.; BHAKOO, V. Adding value through outsourcing: Contribution of 3PL services to customer performance. **Management Research News**, Vol. 30 No. 3, pp. 228-35. 2007.

PRANDTSTETTER, G. RAIDL, G. MISAR, T. A hybrid algorithm for computing tours in a space part warehouse. **Lecture Notes in Computer Science**, 5482, pp. 25-3, 2009.

RODRIGUES, Paulo R. A. **Gestão Estratégica da Armazenagem**. Editora Aduaneiras, 2ª edição. São Paulo. 2007.

ROODBERGEN, K. J., SHARP, G. P., AND VIS, I. F. A. Designing the layout structure of manual order-picking areas in warehouses. **IE Transactions** 40(11), 1032-1045. 2008.

ROODBERGEN, K.; KOSTER, R. Routing order pickers in a warehouse with a middle aisle. **European Journal of Operational Research**. Vol 133 (1), pp. 32-43, 2001.

ROODBERGEN, K J; VIS, I F. A. A model for warehouse layout. **IEEE Transactions**, Vol 38, pp. 799-811. 2006.

ROSEMBLATT, M. The dynamics of plant layout. **Management Science**. Vol 32 (1), pp. 76-86. 1986.

ROSENBLATT, M. J.; ROLL, Y. Warehouse capacity in a stochastic environment. **International Journal of Production Research**. Vol: 26, pp. 1847–1851. 1988.

RUBRICO, J.I.U.; OTA, J.; HIGASHI, T.; TAMURA, H. Metaheuristic scheduling of multiple picking agents for warehouse management, **Industrial Robot: An International Journal**, Vol. 35 Iss: 1 pp. 58 – 68. 2008.

SAID, B. L.; HMIDEN, M.; GHEDIRA, K. A two-setp transshipment model with fuzzy demands and service level constraints. **International Journal of simulation model**. Vol 9; pp 40-52. 2010.

SANEI, O., NASIRI, V., MARJANI, M.R., MOATTAR HUSSEINI, S.M. A heuristic algorithm for the warehouse space assignment problem considering operational constraints: with application in a case study. **Proceedings of the 2011 International Conference on XXI Industrial Engineering and Operations Management**, 2011.

SCHEFFER. **Site da empresa Scheffer Logística**. Conteúdo encontrado em <http://www.schefferlogistica.com.br/>, dia 15/02/2011 as 15:45.

SCHOLZ, D. JAEHN, F. JUNKER, A. Extensions to STaTS for practical applications of the facility layout problem. **European Journal of Operational Research**, Vol. 204, pp. 463–472, 2010.

SHI, Y., & EBERHART, R. C. Empirical study of particle swarm optimization. In **Proceedings** of the congress on evolutionary computation (pp. 1945–1950). New Jersey: IEEE Service Center. 1998a.

SHI, Y., & EBERHART, R. C. Parameter selection in particle swarm optimization. In **Evolutionary Programming, VII: Proceedings**. EP98. (pp. 591–600). New York: Springer-Verlag. (1998b).

STADTLER, H. Optimal dimensions for automated storage/retrieval systems. **Progress in material handling research, the material handling industry of America**, Charlotte, NC, pp 551–571. 1996.

STILL, **equipamentos de movimentação**. Material retirado de www.stillbrasil.com.br em 06/05/2008.

STRACK, G.; POCHET, Y.. An Integrated model for warehouse and inventory planning. **European Journal of Operational Research**. Vol 204; pp 35-50. 2010.

SYKES, D.; WYCOMBE, H. Planning for Excellence in materials Handling. **Journal of Logistics Information Management**. Vol. 7 No 6. 1994.

TAYLOR, David A. **Logística na Cadeia de Suprimentos: uma Perspectiva Gerencial**. ED: 1. Addison-Wesley, 2005.

THORNTON, D.; FRANCIS, R.; LOUE T. Rectangular layout problems with worst-case distance measures. **AIIE Transactions**, vol. 11 (1), pp. 2-11, 1979.

VRYSAGOTIS, V.; KONTIS, P. A.. Warehouse layout problems: Types of problems and solutions algorithms. **Journal of Computations & Modelling**, vol 1, pp. 131-152. 2011.

WANG, S.; JIA, X.; YEH, A. B.; ZHANG, L. Analog layout retargeting using geometric programming. **ACM Transactions on Design Automation of Electronic Systems**, Vol. 16 (4), Article 50, 2011.

WANKE, P. F.; AFFONSO, C. R.. Determinantes da eficiência de escala no setor brasileiro de operadores logísticos. **Prod. [online]**. ahead of print, pp. 1-2, 2010.

WILSON, H. G. **Order quantity, product popularity and the location of stock in the warehouse**, AIIE Trans. Vol 9, pp. 230-23. 1977.

YANG, L.; FENG, Y. Fuzzy multi-level warehouse layout problem: New model and algorithm, **J. Syst. Sci. Syst. Eng.** 15, 493-503. 2006.

YU, M.; De KOSTER, R. The impact of order batching and picking area zoning in order picking system performance. **European Journal of Production Research**, vol 34, n. 2, pp. 363-378, 1996.

ZELMAI, G. J. Optimality conditions and duality for multiobjective measurable subset selection problems. **Optimization**, vol 22, n. 2, pp. 221-238, 1991.

ZHANG, F. Q.; XUE, J.; LAI, K. K. A Class of Genetic Algorithms for multiple-level warehouse layout problems. **International Journal of Production Research**. 40 (3). 731-744. 2002.

ZHANG, G.Q.; LAI, K.K. Combining path relinking and genetic algorithms for the multiple-level warehouse layout problem. **European Journal of Operational Research**. Vol 169, pp. 413-425. 2006.

ZHAO, Z. Y.; ZHAN, Y-R.; BO, LI. Dynamic scheduling method on warehouse layout in distribution centers. **Journal of Computer Applications**, vol 2. 2008.

APÊNDICE A – Relação de autores e o foco da pesquisa com relação às variáveis de decisão nos projetos de armazenagem

Autor/ Solução	Alocação de Itens em estruturas existentes	Alocação através de políticas de <i>picking</i>	Alocação de Itens em um armazém multi níveis	Configuração dos corredores de acesso	Alocação de Itens bloqueados	Design de Armazéns	Movimentação de materiais
ALSHAYEN, <i>et. al.</i> , 2005			X				
BHASKARAN & MALMBORG, 1989	X						
CHAN & CHAN, 2011					X		
CHANG & WEN, 1997						X	
CORLEY & ROBERTS, 1972						X	
De KOSTER, 2010					X		
DUNKER <i>et. al.</i> , 2005				X			
GOETSCHALCKX & RATLIFF, 1990	X						
GOETSCHALCKX <i>et. al.</i> , 2002					X		
GONG & DE KOSTER, 2011						X	
GUE & MELLER, 2009			X				
GUE <i>et. al.</i> , 2006		X					
GUE <i>et. al.</i> , 2012			X				
HAN & DAMRONGWONGSIRI, 2006	X						
HENN & WÄSCHER, 2012		X					
HERAGU & KUSIAK, 1991			X				
HERAGU & SRINIVASAN, 2011				X			
HARILA, <i>et. al.</i> , 2007	X						
HOU <i>et. al.</i> , 2010		X					
HSIEH & TSAI, 2006		X					
HSIEH <i>et. al.</i> , 2007		X					
HUERTAS <i>et. al.</i> , 2007	X						
HUQ, <i>et. al.</i> , 2006		X					
HWANG & LEE, 1988			X				
HWANG & SONG, 1993			X				
KAIYOU & YUBUI, 2006						X	
KOTHARI & GHOSH, 2013		X					
KUN <i>et. al.</i> , 2011						X	
LAI <i>et. al.</i> , 2002				X			
LARSON, <i>et. al.</i> , 1997		X					
LERHER <i>et. al.</i> , 2007					X		
LIU, 2004		X					
MALMBORG & BHASKARAN, 1990		X					
MALMBORG <i>et. al.</i> , 1986	X						
Autor/ Solução	Alocação de Itens em estruturas existentes	Alocação através de políticas de <i>picking</i>	Alocação de Itens em um armazém multi níveis	Configuração dos corredores de acesso	Alocação de Itens bloqueados	Design de Armazéns	Movimentação de materiais
MATIC <i>et. al.</i> , 2012			X				
MCKENDALL JR, 2008		X					
MOLNÁR & LIPOVSKY, 2008		X					
MOUNTREUIL & RATLIFF, 1989				X			
MUPPANI & ADIL, 2006		X					
MUPPANI & ADIL, 2008		X					
NOVAES, 1989						X	
ÖNÜT <i>et. al.</i> , 2008		X					
PAN & WU, 2012		X					
PANDIT & PALEKAR, 1993							X
PETERSEN & SCHMENNER, 1999		X					
PETERSEN <i>et. al.</i> , 2005		X					
PETERSEN II, 1997		X					
PETERSEN II, 1999		X					
POHL <i>et. al.</i> , 2009				X			
FRANDTSTETTER <i>et. al.</i> , 2009							X
ROODBERGEN & KOSTER, 2001	X						
ROODBERGEN & VIS, 2006		X					
ROODBERGEN, <i>et. al.</i> , 2008		X					
ROSEBLAT & ROLL, 1988			X				
ROSENBLATT, 1986				X			
RUBRICO, <i>et. al.</i> , 2008			X				
SANEI, <i>et. al.</i> , 2011		X					
SCHOLZ <i>et. al.</i> , 2010					X		
STADTLER, 1996							X
THORNTON <i>et. al.</i> , 1979	X						
WANG <i>et. al.</i> , 2011					X		
YANG & FENG, 2006		X					
YU & De KOSTER, 2009		X					
ZELMAI, 1991		X					
ZHANG & LAI, 2006		X					
ZHAO <i>et. al.</i> , 2008							X
Total	8	25	7	7	5	6	8

APÊNDICE B – Outras Estruturas de Armazenagem

B-1: Porta Paletes de Corredores Estreitos

Uma das principais desvantagens das estruturas de porta paletes é a subutilização do espaço físico, sendo que os sistemas de movimentação comuns necessitam de no mínimo 2,5 metros de corredores para manobras (STILL,2008).

Para tanto, as estruturas do tipo Porta Paletes de Corredores Estreitos aumentam esta utilização, pois possuem a movimentação de mercadorias através dos transelevadores e ou empilhadeiras trilaterais. Estes sistemas reduzem o corredor a até 1,5 m de largura e podem armazenar em altitudes muito maiores (MECALUX, 2011; AGUIA, 2010) (Figura B1).

Figura B1: Estrutura autoportante com transelevador.



Fonte: Mecalux (2011)

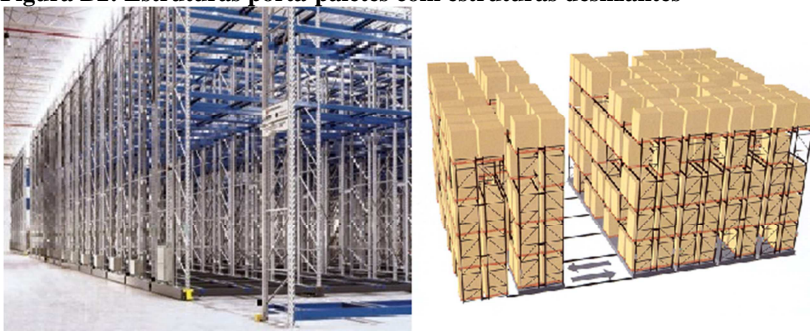
Os transelevadores são controlados por softwares que destinam os paletes a endereços aleatórios, gerenciando o fluxo de movimentações e permitindo maior velocidade nas operações de carga e descarga (RODRIGUES, 2007).

Pode-se observar que a estrutura também reduz o número de pilares dentro dos prédios, pois permite também a utilização como Autoportante onde a fixação do fechamento lateral e da cobertura é feita na própria estrutura de armazenagem, possibilitando a execução em menor tempo e com custo inferior à obra convencional (MECALUX, 2011; SCHEFFER, 2011).

B-2 Porta Paletes Estruturas Deslizantes

Este sistema de armazenagem é de alta densidade, onde o corredor de circulação e acesso é compartilhado em função do sistema eletromecânico de deslocamento lateral dos conjuntos de estruturas Porta Paletes, conforme mostra a figura B2 (MECALUX, 2011; AGUIA, 2010).

Figura B2: Estruturas porta-paletes com estruturas deslizantes



Fonte: Mecalux (2011); Águia (2010)

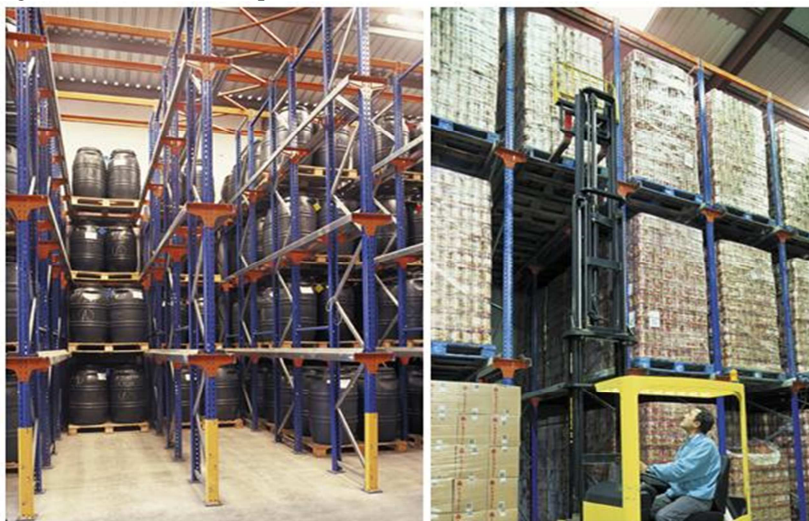
Efetiva-se uma maior ocupação volumétrica do espaço com a manutenção da seletividade. Neste caso, o operador pode deslocar as estruturas e “abrir” um corredor próximo a mercadoria que deseja coletar.

B-3 Estruturas Drive

Estas estruturas são utilizadas como solução na armazenagem de grandes volumes e pouca variedade de itens. Possibilita um bom aproveitamento da área maximizando o volume armazenado pela redução do número de corredores, conforme demonstra a figura B3 (BANZATO *et al.*, 2003; LAM *et al.*, 2011).

Estas estruturas são recomendadas para produtos que são armazenados temporariamente e após o período são retiradas e realocadas em outro armazém e ou estrutura. Este sistema possui uma ótima ocupação volumétrica, mas não possui seletividade (BANZATO *et al.*, 2003; RODRIGUES, 2007).

Figura B3 Estruturas do tipo drive.



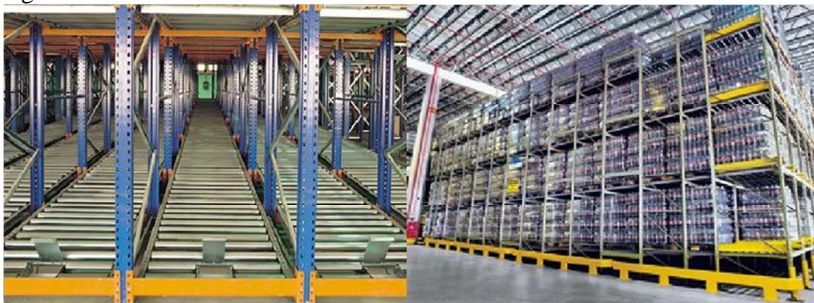
Fonte: Mecalux (2011); Águia (2010)

B-4 Estruturas Dinâmicas

Este sistema é indicado para estocagem de cargas com grande rotatividade e necessidade de controle do prazo de validade pelo princípio FIFO (*First In First Out* - Primeiro que entra é o primeiro que sai). Os paletes são colocados em uma extremidade da estrutura e deslizam sobre roletes até a outra pela ação da gravidade, sendo que a aceleração dos paletes é controlada por reguladores de velocidade (BANZATO *et al.*, 2003; RODRIGUES, 2007). Este sistema proporciona uma extraordinária economia na movimentação e a melhor ocupação volumétrica do espaço (Figura B4).

Estas estruturas possuem um maior custo devido ao sistema de rolete que transporta o paleta de um lado a outro do sistema. Entretanto, proporciona melhor aproveitamento dos operadores, uma vez que não é necessário entrar na estrutura, com a empilhadeira, para retirar os paletes (BANZATO *et al.*, 2003; RODRIGUES, 2007).

Figura B4 Estruturas dinâmicas.



Fonte: Mecalux (2011); Águia (2010)

B-5 Cantilever

O Cantilever são estruturas que permitem a armazenagem de cargas irregulares e volumosas, paletizadas ou não. Caracterizam-se por possuir somente uma coluna central onde são fixados os braços que, em balanço, servirão de apoio para a carga ou planos de armazenagem (Figura B5) (BANZATO *et al.*, 2003; RODRIGUES, 2007).

Figura B5 Estruturas do tipo cantilever



Fonte: Mecalux (2011); Águia (2010)

B-6 Estruturas Push Back

São estruturas que possibilitam uma boa seletividade na armazenagem de alta densidade (Figura B6). Sua configuração é dividida em túneis e permite o acesso direto a cada túnel facilitando a rotatividade (BANZATO *et al.*, 2003; RODRIGUES, 2007).

Figura B6 Estrutura do tipo Push – Back



Fonte: Mecalux (2011); Águia (2010)

O paleta é colocado sobre carrinhos ou roletes e empurrado pela empilhadeira quando esta vai armazenar o paleta seguinte, sendo a descarga feita de forma inversa, utilizando o princípio LIFO (*Last In First Out* - ultimo que entra é o primeiro que sai) (BANZATO *et al.*, 2003; RODRIGUES, 2007).

Este sistema é muito útil em mercadorias que necessitam de controle dos lotes de produção, onde lotes mais novos podem ser mais facilmente localizados.

B-7 Estrutura Mezanino

O mezanino pode ser utilizado para a armazenagem de materiais ou para áreas de trabalho, dimensionado de acordo com a sobrecarga necessária. Possibilita um melhor aproveitamento da altura útil dividindo-a em dois ou mais níveis. É modulado e tem sua montagem rápida, além de possibilitar a aplicação de diversos tipos de pisos (Figura B7) (BANZATO *et al.*, 2003; RODRIGUES, 2007).

Estas estruturas são normalmente montadas para armazenar peças e ou produtos de pequeno tamanho, sendo utilizadas através de escadas e elevadores para subir e descer cargas de maior peso (BANZATO *et al.*, 2003; RODRIGUES, 2007, BALLOU, 1993).

Figura B7 Estrutura do tipo mezanino



Fonte: Mecalux (2011); Águia (2010)

Também possuem grande utilidade para montagem de estruturas administrativas em instalações de armazenagem e ou fabril. Podem ser combinadas com divisórios fechados e ou teladas.

B-8 Estruturas Blocadas

A armazenagem é considerada blocada quando são armazenados os produtos uns sobre os outros. Podem ser armazenadas diretamente palete sobre palete ou com estruturas metálicas (BANZATO *et al.*, 2003; RODRIGUES, 2007, BALLOU, 1993).

A estrutura de *rack* tubular possibilita transportar, armazenar, agrupar, distribuir e expor mercadorias. Construída em estrutura metálica tubular e fechamento em arame, tem capacidade de carga para 1.200 kg. É auto empilhável montada em até 5 níveis de alturas. Possui facilidade na desmontagem e montagem, exigindo apenas uma pessoa. Quando desmontada ocupa somente $\frac{1}{4}$ de seu volume (Figura B8) (Fonte: Mecalux, 2011; Águia, 2010).

São desenvolvidas para atender as mais diversas modalidades de armazenagem e movimentação, são leves e possuem ótima estabilidade. Podem ser auto-empilháveis ou armazenadas em porta-paletes.

Este sistema é de fundamental importância para aquela armazenagem onde não exista o espaço fixo, sendo necessário alterar o local de armazenagem constantemente.

Figura B8 Rack para armazenagem bloqueada.



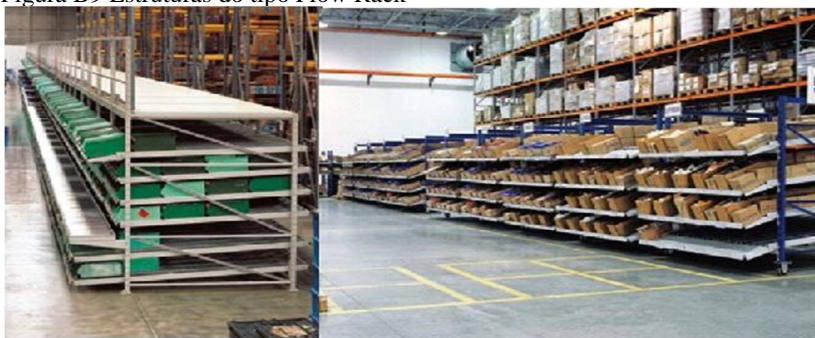
Fonte: Mecalux (2011); Águia (2010)

B-9 Flow Racks

Este sistema é indicado para pequenos volumes e grande rotatividade onde se faz necessário o *picking*, facilitando a separação de materiais. Sua configuração permite naturalmente o princípio FIFO. A posição inclinada dos trilhos de roldanas facilita o deslizar das caixas (Figura B9) (Mecalux, 2011; Águia, 2010).

Uma boa utilização é para empresas com grande quantidade de itens pequenos e bastante variedade nos pedidos, otimizando assim o tempo de separação dos materiais.

Figura B9 Estruturas do tipo Flow Rack



Fonte: Mecalux (2011); Águia (2010)

APÊNDICE C – Outros Equipamentos de Movimentação

C-1 Equipamentos de Movimentação

Os carrinhos de transporte manual são utilizados como veículos para separação de pedidos em locais com pequenas e médias distâncias. Neste caso, empresas que trabalham com itens de pequeno tamanho e pouco peso, podem utilizar para consolidar os pedidos dos clientes, similar ao “carrinho” de compras no supermercado (Figura C1).

Figura C1 Tipos e modelos de carrinhos manuais



Fonte: Rodrigues (2007)

Por outro lado, as esteiras transportadoras são equipamentos motorizados utilizados para transportar produtos em longas distâncias com fluxo contínuo, sem a necessidade de um operador fixo, como funcionam os carrinhos manuais. Estas esteiras são utilizadas para ligar mais de um processo de produção e ou linhas de separação. A melhor utilização deste sistema é em conjunto com esteiras de roletes que utilizam a gravidade como impulsionador dos produtos (Figura C2) (MECALUX, 2011).

As esteiras de movimentação por gravidade possuem a vantagem de não utilizar a eletricidade como fonte de energia, economizando assim custos adicionais, incluindo manutenção de equipamentos (MECALUX, 2011).

Figura C2 Esteiras motorizadas e por roletes com uso da gravidade



Fonte: Mecalux (2011)

Já para a movimentação de equipamentos e produtos pesados e com dimensões elevadas, é necessária a utilização de monovias e ou pórticos, que são específicos para movimentação pesada (Figura C3).

Figura C3 Monovia e Pórtico para movimentação de cargas pesadas.



Fonte: Alphatec (2011)

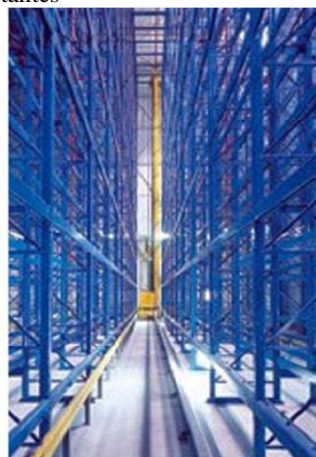
O pórtico e a monovia possuem um sistema semelhante, onde são utilizados motores para movimentar o produto em um trilho alocado a certa altura. No caso do pórtico, este trilho é limitado e existe a possibilidade de movimentar o pórtico em conjunto com o produto movimentado, através de um sistema de rodas (ALPHATEC, 2011).

A monovia possui um raio de ação maior, podendo transportar mais peso, somente possui a limitação do trilho ser fixo. Com isso, a linha de movimentação deve ser muito bem projetada para que não existam necessidades de mudanças na localização destes equipamentos (ALPHATEC, 2011).

Estes equipamentos são restritos a empresas que trabalham com montagem de equipamentos pesados e que necessitam transportar peças até a linha de montagem. Serrarias e empresas de fundição utilizam estes para evitar o contato do operador com o produto e também auxiliá-lo no aumento da produtividade.

Por outro lado, o equipamento de movimentação que possui a maior automação na movimentação de materiais é o transelevador. Este equipamento possui a característica de movimentar paletes através de um sistema de trilhos, incluindo movimentos na vertical. Estes equipamentos são mais usuais em grandes centros de distribuição e ou depósitos, onde a variedade de mercadorias é muito alta e concentra um grande volume armazenado (Figura C4) (SCHEFFER, 2011).

Figura C4 Transelevador para estruturas auto portantes

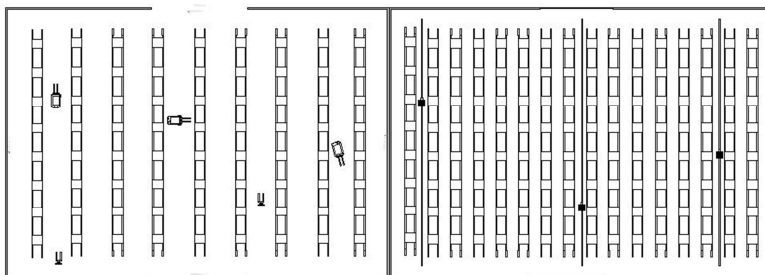


Fonte: Scheffer (2011)

Os principais benefícios deste equipamento é a redução dos corredores entre os porta-paletes de 2,5 m para até 1,5 m. O ganho de 1m parece não representativo, mas em um depósito de 30m X 40m, perfaz um ganho de 77% da capacidade armazenada, saindo de 9 níveis

de estruturas porta-paletes para 16 níveis de estruturas porta-paletes (Figura C5) (SCHEFFER, 2011).

Figura C5 Movimentação por empilhadeiras e com movimentação por transelevadores.



Outra vantagem dos transelevadores é a otimização na movimentação, pois estes são guiados por automação e os softwares de gestão dos depósitos e armazéns gerenciam a movimentação. Quando novos pedidos entram no sistema, o mesmo gerencia a fila de separação e prioriza as separações, informando ao transelevador quais devem ser as sequências de movimentações (SCHEFFER, 2011).

APÊNDICE D – Outros Equipamentos de Movimentação

D-1 Classificação e Codificação de Materiais

Os materiais são designados como item, e este termo é aplicado a um conjunto de objetos que possuem a mesma característica (MOURA, 2004; PETERSEN II, 1997).

Como exemplo, consideremos uma garrafa de refrigerante de 2 litros em um pacote com 6 unidades em um supermercado. Apesar de poder haver diferença entre uma garrafa e outra (pequenas diferenças dimensionais, de peso, etc.), para o cliente que adquire uma garrafa do pacote essas diferenças praticamente não têm interesse algum (RODRIGUES, 2007).

Neste exemplo acima, a garrafa é um item de material. As características que definem esta garrafa (volume líquido, composição, tipo da garrafa, marca, tipo do refrigerante, data de validade etc.) são as mesmas para as outras garrafas do pacote.

Um item pode especificar, também, um produto vendido a granel. Quando colocamos combustível em um posto, a gasolina comum é um item. Este também pode se referir, ainda, a um conjunto de peças iguais em uma embalagem (uma caixa de borracha escolar com várias borrachas) ou a um conjunto de peças diferentes (um “*kit*” de ferramentas, por exemplo) (RODRIGUES, 2007; MOURA, 2004).

Numa empresa existem itens que são estocados e itens que são utilizados imediatamente após a aquisição (ou que se comportam, para fins contábeis, como se fossem utilizados imediatamente após a aquisição). Geralmente são denominados, respectivamente, itens de estoque e itens que não são de estoque (RODRIGUES, 2007; DONATH *et al.*, 2002).

A embalagem com que o material é comercializado, por ser uma característica que pode ser importante para o cliente, pode determinar a existência de itens diferentes para o mesmo material básico. Como exemplo, refrigerante em embalagens de 1 litro é um item diferente de refrigerante em embalagens de 600 ml.

Em algumas situações, a marca do produto é uma característica importante, pois pode determinar diferença de preço, qualidade, confiança a marca do produto, entre outros. Neste caso, para cada marca tem-se um item diferente (RODRIGUES, 2007; DONATH *et al.*, 2002).

Quando a marca e ou o fabricante do produto não é importante, então, podem-se considerar estes produtos como mesmo item de estoque. Por exemplo, uma gráfica que utiliza papel cartão 200 g/m² de

dois fabricantes (A e B) sem restrição. Neste caso, podem-se classificar e armazenar os dois produtos como mesmo item de estoque.

A identificação de itens de material em uma organização pode ser feita de diversas formas, dependendo de onde é utilizada: Código do produto, item de série, número do lote, identificação por atributos e identificação por códigos (RODRIGUES, 2007; FABER *et al.*, 2002).

O código do produto aplica-se ao item e em uma organização, este pode ter vários significados: código interno, número de desenho, código do fabricante, código do fornecedor, número de catálogo, amostra, protótipo, modelo, aplicação, nome, descrição, norma técnica, especificação, código internacional de produtos (código de barras) entre outros.

Existem situações em que é importante a distinção de cada uma das peças de um item. Como exemplo típico, os itens que possuem garantia (televisores, equipamentos, carros) tornam necessária a identificação de cada peça isoladamente. Essa identificação é feita por um código denominado número de série. O número de série é, portanto, uma espécie de detalhamento do código do produto (RODRIGUES, 2007; BROWN, 1990).

Os itens onde há necessidade de utilização de número de série são conhecidos, habitualmente, como itens de série.

O número do chassi de um automóvel é um número de série típico. Na fábrica de automóveis todos os chassis com as mesmas características correspondem ao mesmo item, porém possuem números de série diferentes. O número de série individualiza o produto.

Certos materiais, tanto por necessidade legal como por interesse de controle de qualidade, devem ser identificados por lotes de fabricação. Essa identificação pode ser feita no próprio produto ou em sua embalagem e visa localizar todos os produtos (peças, remédios, produtos metalúrgicos, alimentos), com algum tipo de problema detectado tanto pelos clientes como pela própria empresa. Esta característica é chamada de rastreabilidade (RODRIGUES, 2007; MOURA, 2004).

Uma empresa que fabrica rolamentos, por exemplo, pode detectar uma incidência muito grande de refugos no processo de fabricação. É importante, nesse caso, que o controle de produção permita rastrear o processo de fabricação até a identificação do lote da matéria prima utilizada no processo, para poder pesquisar as possíveis causas do problema.

A descrição de um item através de suas características, atributos e propriedades são conhecidos pela nomenclatura de especificação. A

especificação é, em geral, empregado com o significado de identificar precisamente o material, de modo a torná-lo específico, principalmente para fins de aquisição (RODRIGUES, 2007; MOURA, 2004).

É fundamental a padronização da nomenclatura através de estruturas de nomes ou palavras-chaves, dimensões, características físicas, embalagem, aplicação, características químicas, etc. Por exemplo, a arruela pode ser discriminada como: arruela (nome básico) lisa (modificador) de cobre (modificador). Assim, existirá uma maior facilidade para encontrar os itens a partir de sua nomenclatura e encontrar o material pretendido (RODRIGUES, 2007; MOURA, 2004).

Entretanto, a identificação por códigos é a mais utilizada, pois ela pode ser feita por diversos tipos de códigos através da combinação alfa-numéricos. Assim, podem-se dividir os materiais em sequência, grupos, classe, seções, e outros. O que é fundamental é que para cada item haja um só código.

Por exemplo:

Código: 100.01.15.0075: Arruela de Pressão Ø interno = 12mm e Ø externo = 15mm

Onde:

100 = Identificação da seção = Ex: Manutenção;

01 = Identificação da classe = Ex: Peças de Reposição'

15 = Identificação do grupo = Ex: Arruela de Pressão

0075 = Identificação individual sequencial = Ex: Arruela de Pressão Ø interno = 12mm e Ø externo = 15mm

Em algumas situações, a empresa adquire de fornecedores, materiais e ou peças que já possuem seus próprios códigos. Neste caso, é interessante elaborar uma tabela de equivalências entre o código interno da empresa e os vários códigos de seus fornecedores ou clientes (RODRIGUES, 2007; MOURA, 2004; BHASKARAN & MALMBORG, 1989).

A classificação tem a finalidade de separar um conjunto de itens em classes. É importante distinguir-se bem a diferença entre identificação e classificação. A identificação busca uma identidade do material, ou seja, busca torná-lo único. Um item só pode estar associado a um único código de identificação, ao passo que pode estar associado a várias classes simultaneamente (BALLLOU, 1993; BOWERSOX & CLOSS; 2001).

É recomendável que o sistema de classificação permita que um mesmo item possa ser classificado em quantas classes forem

necessárias. Assim, o produto álcool pode ser classificado por função tanto como solvente como combustível. A seguir se encontram exemplos dos diversos tipos de classificação que podem ser feitas com os itens de uma empresa (RODRIGUES, 2007; MOURA, 2004; BALLOU, 2001):

- Natureza: características físico-químicas;
- Produtos de aço: barras, chapas;
- Madeiras : compensados, tábuas, toras;
- Produtos de petróleo: combustíveis, graxas, óleos;
- Produtos químicos: ácidos, acetatos, nitratos;
- Combustíveis: gasolina, álcool;
- Solventes: álcool, querosene, água raz;
- Materiais de fixação e ligação: pregos, parafusos e porcas;
- Rolamentos: de esfera, de rolos cônicos, de agulhas; etc.

Esta classificação é apenas um exemplo de como classificar os itens em alguns grupos. Neste caso, tanto o código como a forma de classificar é perfeitamente moldável a cada tipo de empresa. O único pré-requisito é que esta política de identificação e classificação exista para que não ocorram cadastramentos aleatórios dos produtos no sistema de informação da empresa.

A excessiva variedade de itens em uma empresa causa um aumento de custo, tanto devido ao excesso de estoques como à necessidade de controlar muitos itens. É importante que uma organização se preocupe em reduzir a variedade de itens ao estritamente necessário, evitando itens que não são típicos do mercado fornecedor (CHOPRA & MEINDL, 2004; TAYLOR, 2005).

A padronização de materiais busca reduzir a variedade de itens e, ao mesmo tempo, a utilização de materiais que são facilmente encontrados no mercado fornecedor, desde que atendam às exigências de qualidade da empresa.

D-2 Sistemas de Localização

Uma das principais razões em utilizar a codificação de materiais é para identificar o item. Outro ponto importante nos estoques é o método para localizar materiais. Provavelmente, em uma pequena loja, os funcionários possuem facilidade em localizar os itens devido a sua pouca quantidade e o pequeno espaço de armazenagem. Entretanto, em

estoques onde existem grande volume e variedade de itens, esta localização pelo método da “memorização” das pessoas não funciona muito bem (CHOPRA & MEINDL, 2004; TAYLOR, 2005).

Imaginem o tempo perdido dos funcionários se os mesmos necessitam achar um item em um estoque com, por exemplo, mais de 4.000 posições de armazenagem. Em pedidos com múltiplos itens, este mesmo funcionário poderia passar horas tentando separar os produtos solicitados.

Outro exemplo de fácil entendimento é quando as pessoas vão fazer compras nos supermercados. Os itens armazenados possuem uma lógica e são separados por classe, como: materiais de limpeza, higiene pessoal, roupas, eletroeletrônicos, bebidas, frios, etc. Toda vez que o supermercado altera a lógica de armazenagem, colocando os frios no final das “gôndolas” ao invés de dispor no início, provavelmente os clientes ficarão momentaneamente confusos e precisarão de um tempo maior para localizar os itens desejados. Isso também ocorre quando o cliente vai a outro supermercado, onde provavelmente ele despenderá um tempo maior para terminar suas compras (STRACK & POCHET, 2010).

Analogamente, os armazéns industriais e de logística possuem as mesmas situações. Os itens armazenados podem ter sua localização mudada, bem como, os funcionários que ali trabalham, também podem ser mudados. Em uma situação destas, o tempo necessário para que o novo funcionário se adapte ao armazém e ou o funcionário antigo localize as novas posições de armazenagem, prejudicariam e muito a produtividade do depósito (MOURA, 2004; HENN & WÄSCHER, 2012).

Aliado a estes fatos, nos últimos anos, a logística vem se tornando uma das áreas mais visadas em termos de estratégia nas médias e grandes corporações, devido a sua crescente complexidade operacional. A cada ano aumenta a variedade de produtos, as entregas passam a ser mais frequentes, são exigidos menores tempos de atendimento e erros de separação de pedidos não são mais tolerados. Assim sendo, uma metodologia para localizar com mais facilidades os itens é necessária (BICKCHIN *et al.*, 2012).

O método mais usual de localização em um armazém é similar ao “CEP” (Código de Endereçamento Postal) para os Correios. Neste caso, o CEP é utilizado para localizar a cidade, o bairro e muitas vezes até a rua para onde deve ir a encomenda.

Nos sistemas de armazenagem, este código de localização normalmente possui uma lógica e utiliza a codificação alfa-numérica (RODRIGUES, 2007; MOURA, 2004).

Por exemplo, após o recebimento físico de mercadorias, existe a necessidade de um método que indique onde os materiais estão estocados, sendo que cada item deve ter uma locação ou endereçamento próprio dentro da área de estocagem (BASILE *et al.*, 2012).

Se existirem vários prédios com áreas de estocagens, todas devem ser numeradas e arrançadas da mesma maneira, sendo que qualquer pessoa familiarizada com este método possa encontrar uma localização de um item em qualquer outra instalação (RODRIGUES, 2007; MOURA, 2004).

Este método de identificação da localização consiste em construir "ruas" para cada corredor de passagem entre os sistemas de armazenagem. Cada rua tem os níveis de estocagem numerados que comportam os paletes ou contenedores (RODRIGUES, 2007; MOURA, 2004).. Normalmente, em termos de profundidade, a numeração é ímpar no lado esquerdo do corredor e par no lado direito (Figura 27).

Um item que esteja armazenado no endereço C.3.B, significa que está na Rua C, na posição 3 e na altura B (2º piso do sistema de armazenagem). O item J.7.C, está localizado na Rua J, na posição 7 e altura C (3º piso do sistema de armazenagem), conforme ponto marcado com um círculo na figura D1.

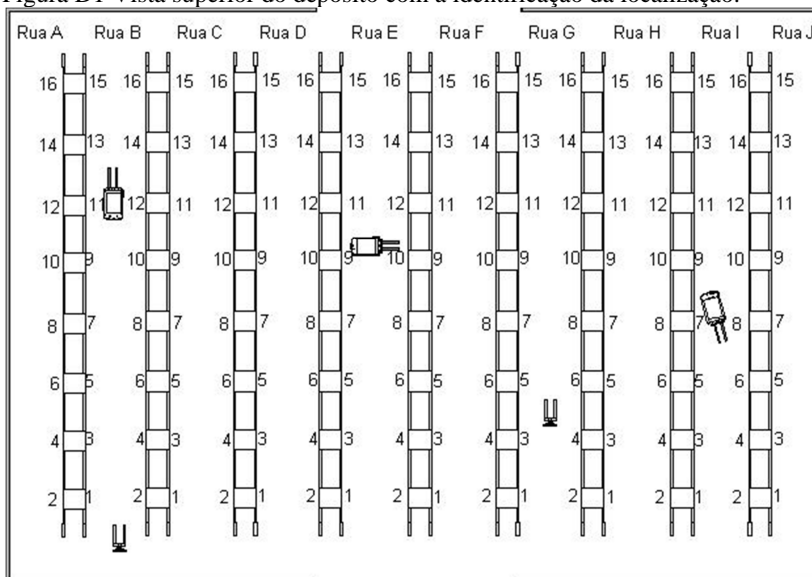
A grande maioria dos *softwares* de controle de estoque possui a opção de controle da localização. Este recurso auxilia no momento do recebimento da mercadoria e no momento da separação de materiais. No momento do recebimento, o sistema informa onde deve ser enviado o material, e no momento da separação, o sistema já coloca os itens em ordem de roteiro para minimizar o espaço percorrido (LINDLEY *et al.*, 2008; CONNOLLY, 2008).

Outra possibilidade é a utilização da localização aleatória, que consiste em designar uma posição de armazenagem aleatória no armazém, ou seja, em qualquer lugar do armazém onde tiver um espaço disponível (RODRIGUES, 2007; MOURA, 2004).

Assim, após o recebimento de algum item, é feita uma consulta via sistema para verificar se já existe estoque deste item e qual sua localização. Ao verificar existência do item em algum local de armazenagem, identifica se este local tem espaço disponível. Se houver espaço disponível, armazena-se o item neste local e atualiza-se o registro de localização. Ao não existir o item ou local disponível, o

sistema determina uma posição aleatória de armazenagem (LINDLEY *et al.*, 2008; TAYLOR, 2005).

Figura D1 Vista superior do depósito com a identificação da localização.



O sistema guarda a informação da posição dos itens mediante o pedido de recebimento. Ou seja, os lotes anteriores serão apontados em suas posições originais e o lote do novo pedido é apontado para a nova posição (RODRIGUES, 2007; MOURA, 2004; DAI & LEE, 2012).

A utilização da localização e também da localização aleatória, disponibiliza todos os boxes existentes para armazenagem, comportando um grande número de itens sem a necessidade de estimativa minuciosa de demanda de entrada e saída. Este método também não depende somente da memória do operador para localizar os itens (RODRIGUES, 2007; MOURA, 2004).

O método de localização funciona melhor quando utilizado juntamente com um sistema de informação que permita este controle. Assim, todos os recursos de facilidade na localização no recebimento, *picking* (separação de pedidos) e expedição serão utilizadas (LINDLEY *et al.*, 2008; CHAN & CHAN, 2011).

APÊNDICE E – Modelos utilizados nas pesquisas levantadas

Autor/ Solução	Programação Linear	Métodos Heurísticos	Programação não linear	Método Metaheurísticos	Algoritmos baseados na geometria	Programação Dinâmica	Programação Estocástica
ALSHAYEN, <i>et. al.</i> , 2005				X			
BHASKARAN & MALMBORG, 1989						X	
CHAN & CHAN, 2011		X					
CHANG & WEN, 1997						X	
CORLEY & ROBERTS, 1972				X			X
De KOSTER, 2010				X			
DUNKER <i>et. al.</i> , 2005					X		
GOETSCHALCKX & RATLIFF, 1990		X					
GOETSCHALCKX <i>et. al.</i> , 2002				X			
GONG & DE KOSTER, 2011						X	
GUE & MELLER, 2009					X		
GUE <i>et. al.</i> , 2006						X	
GUE <i>et. al.</i> , 2012				X			
HAN & DAMRONGWONGSIRI, 2006				X			
HENN & WÄSCHER, 2012				X			
HERAGU & KUSIAK, 1991					X		X
HERAGU & SRINIVASAN, 2011						X	X
HARILA, <i>et. al.</i> , 2007				X			
HOU <i>et. al.</i> , 2010		X					
HSIEH & TSAI, 2006				X			X
HSIEH <i>et. al.</i> , 2007				X			
HUERTAS <i>et. al.</i> , 2007		X					
HUQ, <i>et. al.</i> , 2006		X					
HWANG & LEE, 1988		X					
HWANG & SONG, 1993		X					X
KAIYOU & YUBUI, 2006				X			X
KOTHARI & GHOSH, 2013						X	X
KUN <i>et. al.</i> , 2011				X			
LAI <i>et. al.</i> , 2002			X				
LARSON, <i>et. al.</i> , 1997	X						
LERHER <i>et. al.</i> , 2007				X			
LIU, 2004			X				
MALMBORG & BHASKARAN, 1990				X			
MALMBORG <i>et. al.</i> , 1986	X						
MATIC <i>et. al.</i> , 2012							
MCKENDALL JR., 2008							X
MOLNÁR & LIPOVSKZ, 2008							X
MOUNTREUIL & RATLIFF, 1989						X	
MUPPANI & ADIL, 2006							X
MUPPANI & ADIL, 2008							X
NOVAES, 1989		X					
ÖNÜT <i>et. al.</i> , 2008						X	
PAN & WU, 2012						X	
PANDIT & PALEKAR, 1993						X	
PETERSEN & SCHMENNER, 1999		X					
PETERSEN <i>et. al.</i> , 2005						X	
PETERSEN II, 1997				X			
PETERSEN II, 1999				X			
POHL, <i>et. al.</i> , 2009		X					
PRANDTSTETTER <i>et. al.</i> , 2009							X
ROODBERGEN & KOSTER, 2001							X
ROODBERGEN & VIS, 2006						X	
ROODBERGEN, <i>et. al.</i> , 2008						X	
ROSEMBLAT & ROLL, 1988							X
ROSENBLATT, 1986		X					
RUBRICO, <i>et. al.</i> , 2008		X					
SANEI, <i>et. al.</i> , 2011			X				
SCHOLZ <i>et. al.</i> , 2010						X	
STADTLER, 1996							X
THORNTON <i>et. al.</i> , 1979							X
WANG <i>et. al.</i> , 2011						X	
YANG & FENG, 2006						X	
YU & De KOSTER, 2009							X
ZELMAI, 1991			X				
ZHANG & LAI, 2006		X					
ZHAO <i>et. al.</i> , 2008							X
Total	4	16	3	20	8	5	10

APÊNDICE F – Formulário para o levantamento do custo do terreno

Consulta de Preço do m2 para terreno em regiões industriais.		
Nome da Imobiliária		
Cidade		
Descrição	Unidade	Valor
Tamanho do terreno	m2	
Custo do Terreno	R\$	
Obs: Infraestrutura mínima para o terreno consultado Próximo a rodovias de escoamento Suprimento elétrico de alta potência Rede de fibra ótica Grande volume de água Grande volume de gás		

APÊNDICE G – Formulário para os parâmetros das estruturas de armazenagem

Dimensionamento da Estrutura Porta Paletes			
Empresa			
Parâmetros do Palete			
Largura do Palete	Lp	1,20	m
Altura do Palete	Ap	0,15	m
Altura máxima da carga	Ac	1,50	m
Profundidade do palete	Pp	1,00	m
Peso da carga	P	1.500	kg
N. de paletes entre colunas		3,00	paletes
		Altura Total da Estrutura (He)	
Parâmetros da Estrutura (metros)		$0 \leq He \leq 3$	$3 < He \leq 6$
Folga entre paletes	fp		
Folga entre palete e longarina	fa		
Folga na profundidade do palete	fc		
Parâmetros da Estrutura (metros)		Medida	
Largura da Coluna da Estrutura	Lcl		
Altura da Longarina	Al		
Altura máxima da carga	Ac		
Custo da estrutura (R\$)		Conjunto de Armazenagem	Custo Adicional para elevar o nível da estrutura
Comprimento da Longarina, 4,32 m (Padrão 1)			
Comprimento da Longarina, 4,42 m (Padrão 2)			
Desenho com legendas			
<p>The drawing illustrates a pallet rack system. The side view on the left shows two levels of the rack. Key dimensions labeled include: 'Comprimento da longarina' (top horizontal dimension), 'Largura do Palete' (width of the pallet), 'Largura da Coluna' (width of the column), 'Altura da Longarina' (height of the beam), 'Altura do palete + carga' (height of the pallet plus load), and 'Altura máxima' (maximum height). The front view on the right shows a forklift loading a pallet. Labels include: 'Folga entre montantes' (gap between uprights), 'Fundo do montante' (back of the upright), 'Fundo do palete' (back of the pallet), 'Largura do corredor entre pilas' (aisle width between stacks), and 'Largura do corredor entre colunas' (aisle width between columns).</p>			

APÊNDICE H – Formulário para o levantamento dos custos de construção

Consulta de Preço do m2 para construção em regiões industriais.		
Nome da Empreiteira		
Cidade		
Pé direito mínimo		
Descrição	Unidade	Valor
Tamanho da Obra	m2	
Orçamento de Construção	R\$	
Custo de elevação do prédio		
Descrição	Unidade	Valor
Altura a elevar	m	
Orçamento adicional	R\$	
Obs: Condições mínimas para o orçamento Estrutura pré-fabricada Telhado em zinco Fechamento em zinco com 1 porta de entrada Capacidade de recebimento de carga do piso 10 tons/m2		

APÊNDICE I – Formulário para os parâmetros dos equipamentos de movimentação

Parâmetros dos Equipamentos de Movimentação (Fornecedor do Equipamento)					
Nome da Empresa					
Fabricante do equipamento					
Parâmetros do Palete					
Largura do Palete	<i>L_p</i>	1,20	m		
Altura do Palete	<i>A_p</i>	0,15	m		
Altura máxima da carga	<i>A_c</i>	1,50	m		
Profundidade do palete	<i>P_p</i>	1,00	m		
Peso da carga	<i>P</i>	1.500	kg		
Parâmetros (metros)/ Equipamento	Altura Máxima de Elevação	Largura Mínima do Corredor de Passagem	Velocidade máxima de deslocamento (<i>V_{mdh}</i>) - Km/h	Velocidade máxima de elevação (<i>V_{mdv}</i>) - m/s	Custo do Equipamento (R\$)
Stacker					
Empilhadeira a combustão					
Empilhadeira elétrica					
Empilhadeira Retrátil					
Empilhadeira Bilateral					
Empilhadeira Trilateral					

Parâmetros dos Equipamentos de Movimentação (Empresa que possui o Equipamento)				
Parâmetros (metros)/ Equipamento	Custo Combustível (R\$/mês)	Custo de Manutenção (R\$/mês)	Velocidade média de deslocamento (<i>V_{mdh}</i>) - Km/h	Velocidade máxima de elevação (<i>V_{mdv}</i>) - m/s
Stacker				
Empilhadeira a combustão				
Empilhadeira elétrica				
Empilhadeira Retrátil				
Empilhadeira Bilateral				
Empilhadeira Trilateral				
Observações para levantamento dos estudos de tempo e movimento				
Considerar os deslocamentos em separado, na horizontal e vertical				
Contabilizar o tempo para cada tipo de deslocamento				
Considerar os tempos parados no deslocamento horizontal				
Utilizar mês de referência em que os equipamentos não fiquem ociosos				

APÊNDICE J – CD-Dados Anexo